INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ARQUEOLOGÍA

El nacimiento de la escritura en Egipto

FÍSICA

Nuevo láser de rayos X

PSICOLOGÍA

La importancia del inconsciente

Vida artificial

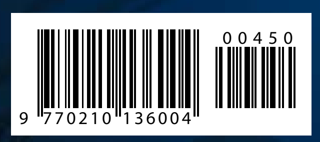
La primera simulación informática de un organismo unicelular

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

VIDA ARTIFICIAL | ORIGEN DE LA ESCRITURA EN EGIPTO | LÁSER DE RAYOS X

N.º 450

MARZO 2014

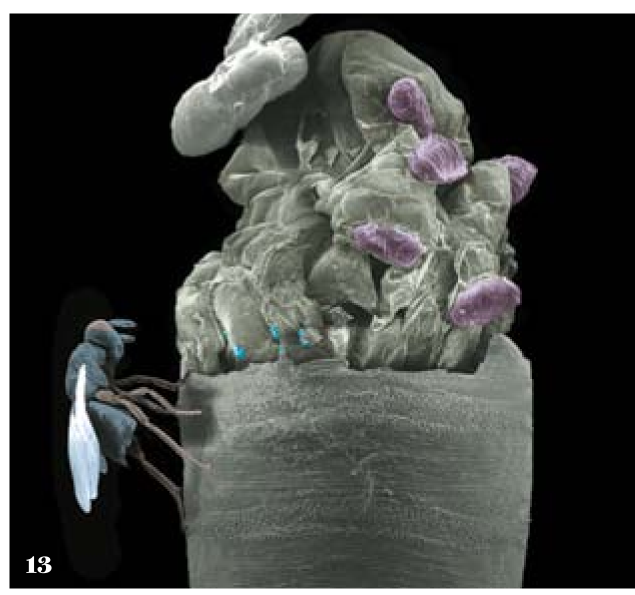


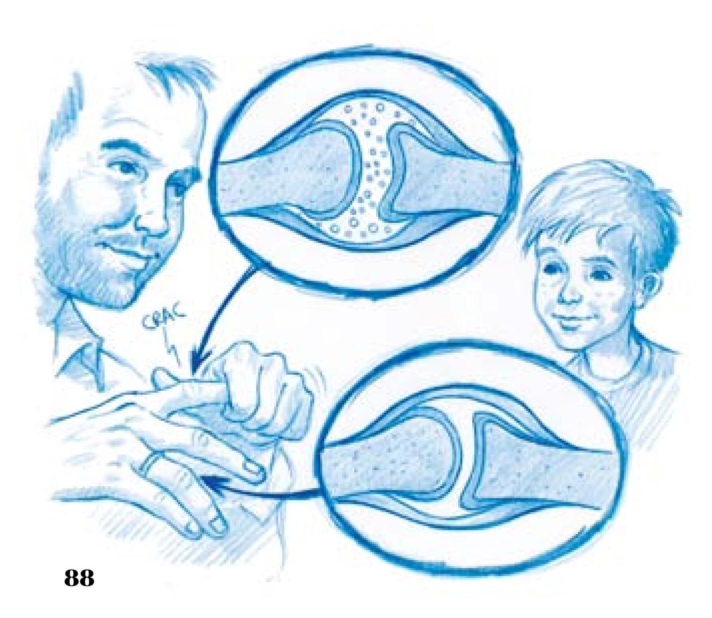
6,50 EUROS



ANDRÉ KUTSCHERAUER


7


13



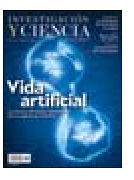
88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La simulación reciente de la vida de una bacteria en un ordenador ha constituido un avance revolucionario. Al incorporar la función de cada gen y molécula del microorganismo, el programa informático ha logrado recrear su ciclo biológico completo, que finaliza con la división celular. Tales modelos podrían cambiar la forma en que estudiamos, entendemos y diseñamos los sistemas biológicos. Ilustración de André Kutscherauer.



redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2013

GENOMA Y FUNCIÓN

Al igual que varios de los responsables del proyecto ENCODE, el artículo «La función reguladora del genoma» [por Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013] da por superado el concepto de «ADN basura», una interpretación más cercana a la ingeniería que a la biología. Los autores asumen que en el genoma todo está para algo, y cualquier actividad bioquímica basta como prueba de alguna función.

Mas, como se expone con amplitud en la sonada crítica que Dan Graur y otros autores publicaron en febrero de 2013 en *Genome Biology and Evolution* («On the immortality of television sets: "Function" in the human genome according to the evolution-free gospel of ENCODE»), la genómica comparada demuestra que, en el curso de la evolución, no más de un 15 por ciento del genoma se ha conservado en algún grado, conque al resto no cabe atribuirle otra función que la de relleno estructural.

Asimismo, hay que tener en cuenta que el tamaño del genoma varía enormemente entre organismos de fenotipo semejante («paradoja del valor C»), variación de la que dan cuenta ciertas regiones que proliferan merced a errores ocasionales en la replicación o al modo parasitario en que su secuencia recluta la maquinaria celular. Solo una pequeña parte de tales parásitos y copias erróneas han sido funcionalmente reaprovechados.

Luis Carlón Ruiz
Oviedo

Responde Daga: *En nuestro artículo se describieron los hallazgos más importantes del proyecto ENCODE, cuyo objetivo ha consistido en caracterizar nuevos elementos reguladores del genoma humano. El descubrimiento de que gran parte de nuestro genoma contiene elementos funcionales ha permitido especular con la idea de que lo que se consideraba hasta entonces «ADN basura» podría ejercer una función reguladora. Si bien la inmensa mayoría de los resultados arrojados por el proyecto han sido acogidos con gran aceptación por la comunidad científica, la idea de dejar atrás el concepto de ADN basura está generando un intenso debate.*

A pesar de que en el proyecto ENCODE se ha descubierto un enorme número de elementos funcionales dispersos en vastas regiones del ADN, se observa una gran variabilidad interespecífica en tales regiones. De este modo, existen especies que, pese a presentar un estrecho parentesco filogenético, poseen genomas de tamaños notablemente distintos. Por tanto, puede argumentarse que todo el ADN «de más» que alberga la especie con el genoma menos compacto podría no tener ninguna función. Estos argumentos son lícitos y retan la visión aportada por los autores del proyecto ENCODE, de ahí el debate.

No hay duda de que nuestro genoma alberga un sinfín de elementos que, en conjunto, podrían seguir considerándose ADN no útil. Entre otros, cabe mencionar las secuencias repetidas; los elementos transponibles que, al saltar de un sitio a otro del genoma, dejan en muchos casos una copia en el lugar donde se hallaban y se insertan al azar en otra región del ADN; o los genes fósiles, aquellos que ya no funcionan o que quizás nunca llegaron a hacerlo.

Puesto que el motor de la evolución es el cambio al azar y la selección natural de los rasgos que confieren una ventaja, aun está por determinar si, desde un punto de vista evolutivo, parte del ADN aparentemente no útil confiere plasticidad al genoma y constituye una base para generar nuevos patrones de expresión génica y, por tanto, nuevas funciones.

Por otro lado, parte del ADN al que supuestamente no se le puede asignar una función podría desempeñar un papel estructural importante. Por último, es posible que la variabilidad encontrada en las regiones reguladoras entre distintas especies refleje aspectos de regulación específicos de cada especie. Por consiguiente, el hecho de que no se hallen conservadas no sería un criterio acertado para considerarlas no funcionales. Aclarar qué parte del genoma es realmente funcional llevará tiempo y exigirá el esfuerzo integrado de investigadores de distintas disciplinas.

El tiempo nos ayudará a valorar la trascendencia del proyecto ENCODE. Proyectos similares se han realizado en otros organismos modelo, como el ratón, la mosca de la fruta o el nemátodo Caenorhabditis elegans. *El análisis comparativo de estos y otros genomas, así como la manipulación empírica de posibles elementos reguladores, arrojarán más luz sobre la evolución de los genomas y permitirá definir con más precisión qué proporción de ellos contiene información útil. Mientras tanto, el debate sobre la existencia de ADN basura en los genomas, entre ellos el nuestro, sigue abierto.*

Erratum corrige

Como señala nuestro lector Santiago Martí Santos, en el artículo «Moléculas especulares», de Sarah Everts [Investigación y Ciencia, enero de 2014], se confunde la quiralidad de los aminoácidos (formas D o L) con su actividad óptica (dextrógiro o levógiro). Para corregir el texto, debe sustituirse «aminoácido levógiro» por «L-aminoácido» o «aminoácido zurdo», y «aminoácido dextrógiro» por «D-aminoácido» o «aminoácido diestro». Este error ha sido enmendado en la versión digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



NEUROCIENCIA

La brigada de reparación del cerebro

Un estilo de vida activo redunda en la salud del cerebro. Eso creen desde hace tiempo los científicos y así lo corroboran los estudios: el ejercicio físico y la actividad intelectual y social —o «enriquecimiento ambiental», como se diría en el lenguaje de la especialidad— potencian el aprendizaje y la memoria y protegen contra el envejecimiento y las neuropatías. Estudios recientes señalan uno de los efectos beneficiosos a escala celular: el enriquecimiento ambiental restaura la mielina del cerebro (el aislamiento protector que recubre los axones, o fibras nerviosas) que se pierde a causa de la edad, las lesiones o ciertas enfermedades, como la esclerosis múltiple. Pero ¿de qué modo propicia el ambiente la reparación de la mielina?

La respuesta radica, al parecer, en unos corpúsculos membranosos naturales llamados exosomas. Diversos tipos de células liberan en los líquidos corporales estas diminutas vesículas de proteínas y material genético. Cargadas con moléculas de señalización, se dispersan por el organismo «como si fueran mensajes dentro de una botella», explica R. Douglas Fields, neurobiólogo de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. A continuación, se dirigen a ciertas células y modifican su comportamiento. En estudios con animales se observó que los exosomas segregados por las células inmunitarias durante el enriquecimiento ambiental estimularon la reparación de la mielina por parte de las células del cerebro.

Los especialistas creen que hay posibilidades de convertirlos en biomarcadores para el diagnóstico de enfermedades o en vehículos para administrar fármacos contra el cáncer u otros compuestos terapéuticos.

Los exosomas producidos en el transcurso del enriquecimiento ambiental transportan microARN (pequeños fragmentos de material genético) que supuestamente ordenan a células inmaduras del cerebro que se transformen en oligodendrocitos, los responsables de la síntesis de mielina. Si se extraen exosomas de la sangre de ratas jóvenes y se inyectan a ratas más viejas se observa un incremento de hasta el 62 por ciento en los niveles de mielina, según describe un equipo de la Universidad de Chicago en el número de febrero de *Glia*.

Se ha descubierto también el modo de crear exosomas fuera del cuerpo y fabricarlos por encargo para posibles tratamientos. A través de la estimulación de células inmunitarias de la médula ósea fue posible imitar las condiciones del enriquecimiento ambiental en una placa de cultivo, asegura Richard Kraig, profesor de neurología en Chicago.

El equipo de Kraig estudia ahora cómo convertir los exosomas en un tratamiento contra la esclerosis múltiple. En un artículo publicado en *Journal of Neuroimmunology* han descrito que los creados en el laboratorio habían estimulado la producción de mielina en una muestra de tejido cerebral de ratas que simulaba las lesiones de la esclerosis múltiple, con un incremento de los niveles de mielina de hasta el 77 por ciento de los valores normales.

El siguiente paso consistirá en ver si los exosomas obtenidos de células inmunitarias son tan eficaces en animales afectados por la enfermedad, aclara Aya Pusic, miembro del equipo. Ella opina que, con algo de suerte, las pruebas en humanos podrán dar comienzo en cinco años. —*Debra Weiner*

CORTESÍA DE NIH COMMON FUND

SISTEMA SOLAR

Planetas enanos solitarios

Plutón fue durante décadas el verdadero peso pesado de los confines del sistema solar. Hoy, sin embargo, sabemos que ese querido mundo no es más que uno de los múltiples planetas enanos conocidos, la mayoría de los cuales orbitan más allá de Neptuno.

El cúmulo de descubrimientos que contribuyeron a que Plutón perdiese la categoría de planeta y se convirtiese en un planeta enano tuvo lugar hace ahora unos diez años. Entre 2002 y 2007, Mike Brown, astrónomo del Instituto de Tecnología de California, y su equipo descubrieron varios objetos de buen tamaño en los arrabales del sistema solar; entre ellos, los planetas enanos Eris, Makemake y Haumea (si bien otro grupo reclama para sí el hallazgo de Haumea). Pero, desde entonces, y a pesar de que el equipo de Brown dejó sin explorar vastas franjas de cielo, el descubrimiento de planetas enanos se ha estancado.

¿La razón? Según un estudio reciente, la mayoría de los objetos brillantes y voluminosos habrían sido localizados ya. Megan Schwamb, antigua estudiante de doctorado de Brown que ahora investiga en la Academia Sínica de Taiwán, llevó a cabo una exploración a gran escala del sistema solar exterior y extrapoló los resultados a fin de estimar el número total de astros de ese tipo. «Vendrían a ser unos doce», explica Schwamb. «Lo cual implica que el inventario de planetas enanos brillantes estaría casi completo.» Schwamb y sus colaboradores publicaron sus resultados el pasado mes de enero en *The Astronomical Journal*.

A pesar de que los astrónomos no han rastreado todo el cielo, sí parecen haber cubierto las zonas en las que tienden a acumularse los planetas enanos. Puede que alguno haya pasado inadvertido, apunta Darin Ragozzine, del Instituto de Tecnología de Florida. El estrellado disco de la Vía Láctea podría haber eclipsado un planeta enano, explica el investigador, pero parece improbable que sean muchos los que queden por descubrir.

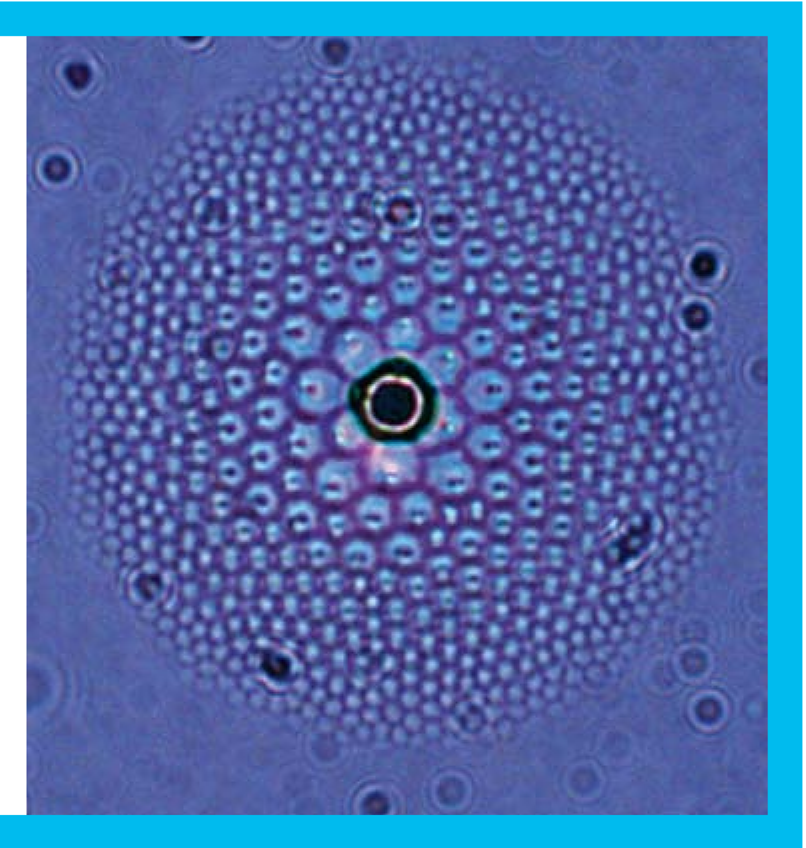
«Hemos vivido una edad de oro en el hallazgo de planetas enanos, pero ya ha pasado», observa Schwamb. Con todo, aún podría haber objetos similares y más alejados, pero apenas visibles con los métodos de detección actuales. «Están ocultos en las sombras, a la espera de que alguien los encuentre», concluye la investigadora. *—John Matson*

¿QUÉ ES ESTO?

Los cristales líquidos, tal y como da a entender su nombre, ocupan un estado intermedio entre el líquido y el sólido. Hace tiempo que los investigadores saben manipular sus alongadas moléculas para controlar la luz en las pantallas digitales. Ahora, un equipo de la Universidad de Pensilvania ha desarrollado un nuevo método para aprovechar sus singulares propiedades. Al depositar un gránulo de sílice sobre una capa de cristal líquido, las fuerzas capilares reordenaron los cristales hasta formar una estructura compuesta por cientos de pétalos diminutos dispuestos alrededor del gránulo. La imagen que reproducimos aquí muestra esa estructura floral. Los resultados se publicaron el pasado mes de diciembre en *Physical Review X*.

En conjunto, los pétalos autoensamblados actúan como una lente compuesta que enfoca la luz de manera muy parecida a como lo hace el ojo de una mosca. Estas lentes podrían mejorar la captación de luz de los paneles solares, así como emplearse a modo de puntas en sondas de fibra óptica que permitiesen a los cirujanos explorar el interior del cuerpo humano.

—Annie Sneed



THOMAS FUCHS (*telescopio*); CORTESÍA DE MOHAMED GHARBI, UNIVERSIDAD DE PENSILVANIA (*cristales*)

BIOQUÍMICA

Cultivar pelo en una placa de Petri

El biólogo celular Desmond Tobin se pasa el día recogiendo órganos de pacientes sometidos a intervenciones de cirugía estética. No se trata ni de riñones ni de otros órganos vitales: se dedica a recolectar retazos de piel extirpados de detrás de la oreja en las operaciones de *lifting* facial. Para él las muestras de piel son preciosas porque albergan unos órganos diminutos, los folículos de los que nace el pelo.

En el Centro de Ciencias de la Piel de la Universidad de Bradford, Tobin extrae con cuidado los folículos y reproduce con ellos el crecimiento del pelo humano en una placa de Petri.

Otros investigadores, como James V. Gruber, director general de investigación y desarrollo de Lonza Consumer Care, ponen a prueba en los folículos extraídos la eficacia de



nuevos productos capilares y dermatológicos sin recurrir a animales de laboratorio. Gruber explicó su trabajo el pasado diciembre en el encuentro anual de la Sociedad de Químicos Cosméticos de EE.UU. y Canadá.

Dos moléculas generan expectativas como tratamientos contra la alopecia, según Gruber. Un péptido de levadura que aparentemente revierte la senescencia de las células foliculares, la entrada en latencia que paraliza su multiplicación. Y una isoflavona antioxidante que aumenta las concentraciones de colágeno y elastina, componentes que refuerzan la matriz cutánea que sostiene los folículos en su lugar.

Tobin y Gruber han trabajado hasta hoy con cabello que ha sido forzado a entrar en senescencia por medios químicos. El paso siguiente consistirá en averiguar si es posible despertar los folículos que de forma natural se han vuelto inactivos. —*Rebecca Guenard*

ECOLOGÍA

Zona vedada al vuelo

En los terrenos del aeropuerto internacional John F. Kennedy (JFK), los técnicos de control de fauna mataron 10.123 aves durante 2012. Situado al noreste de la reserva natural Bahía de Jamaica, en el distrito neoyorquino de Queens, el censo de caza del JFK incluye miles de gaviotas, cientos de estorninos y tórtolas, y una minoría de especies más majestuosas, como el águila pescadora y el cernícalo americano. El programa de control de fauna del aeropuerto, que se aplica desde hace tiempo, es uno más de los muchos que velan por evitar las peligrosas y costosas colisiones de aves con las aeronaves en todo el mundo.

En esta situación, las modernas técnicas forenses tal vez tengan algo que decir para poner freno a esa mortandad. Un equipo de investigación australiano afirma que el ADN hallado en los restos de los pájaros siniestrados puede arrojar luz sobre nuevas estrategias para el control de la avifauna en los aeropuertos.

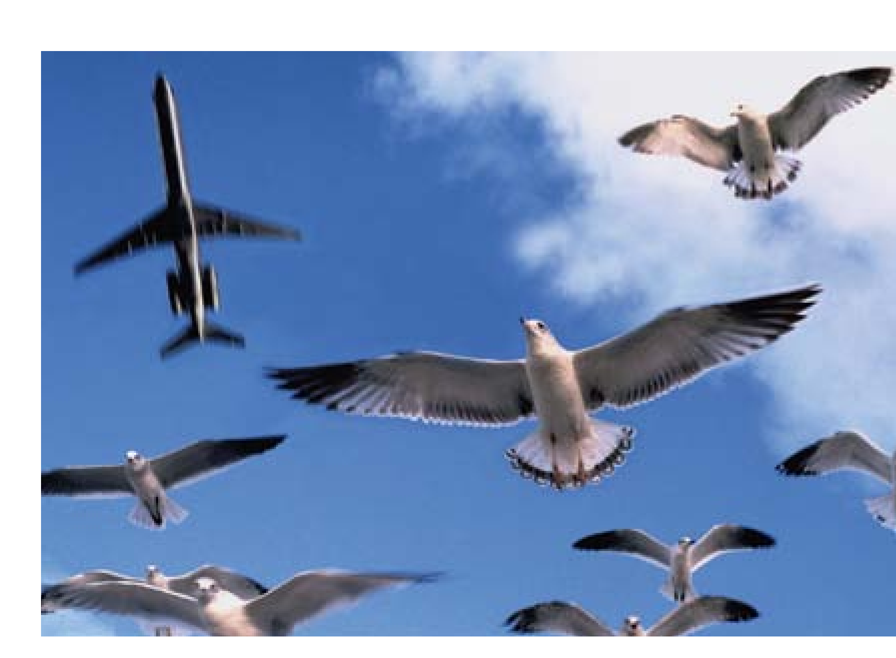
El estudio forense comenzó tras una llamada del personal del aeropuerto de Perth a Michael Bunce, entonces en la Universidad Murdoch. «Tenemos un congelador lleno de pájaros: ¿los querrían?», le preguntaron. Pronto él y sus colaboradores contaron con 77 cadáveres de aves y se pusieron manos a la obra.

Comenzaron por extraer el contenido digestivo de las aves y secuenciar el ADN de este. En un estudio publicado el año pasado en *Investigative Genetics* señalaban que las secuencias génicas halladas pertenecían a especies comunes de ratones, cangrejos de río y saltamontes, así como a plantas gramíneas.

Los análisis genéticos de este tipo podrían informar sobre el tipo de gestión ambiental más adecuada para disuadir a las aves. «¿Qué hacer si los pájaros hallan alimento en la proximidad?», se pregunta Bunce. ¿Hay que controlar las poblaciones de peces de las aguas cercanas, envenenar los roedores o fumigar la zona con insecticidas? En Perth, los resultados de sus investigaciones hicieron que el aeropuerto instalara redes en los cursos de agua para controlar la gambusia, un pez invasor introducido como medio de control de los mosquitos. A su juicio, el estudio ya habrá valido la pena si consigue evitar siquiera una o dos colisiones.

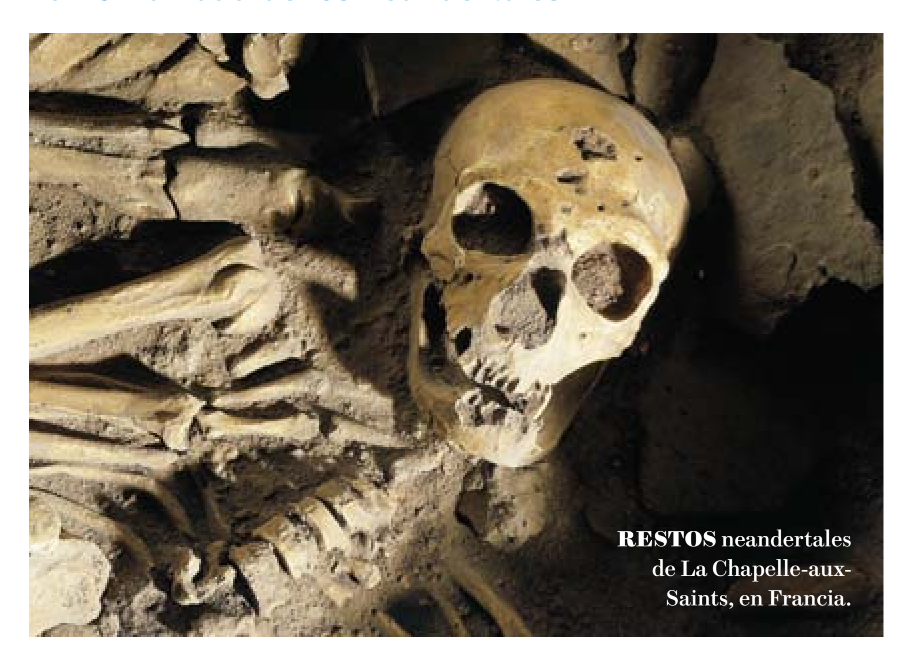
—*Peter Andrey Smith*

THOMAS FUCHS (*ilustración*); TONY CORDOZA, GETTY IMAGES (*gaviotas*)



PALEONTOLOGÍA

La humanidad de los neandertales



RESTOS neandertales de La Chapelle-aux-Saints, en Francia.

Hace unos 60.000 años, en una pequeña gruta caliza situada en lo que hoy es Francia, un grupo de neandertales cavó una fosa y enterró en ella a un individuo de edad avanzada. Esa es la conclusión qua arroja un nuevo estudio sobre el yacimiento en el que en 1908 fue hallado el célebre esqueleto neandertal de La Chapelle-aux-Saints. La investigación entraña importantes consecuencias sobre la manera de concebir el comportamiento y las capacidades cognitivas de nuestros parientes evolutivos más cercanos.

Hace ya tiempo que algunos arqueólogos sostienen que diversos yacimientos neandertales presentan indicios de enterramientos, una práctica considerada clave en la conducta del ser humano moderno. Otros, sin embargo, han objetado que los yacimientos en cuestión fueron excavados hace largo tiempo y con técnicas hoy consideradas poco ortodoxas, las cuales habrían contribuido a enturbiar los hechos.

Durante los últimos años han aparecido pruebas convincentes de que los neandertales practicaban algunas actividades modernas, como decorarse el cuerpo o fabricar herramientas elaboradas. Tales hábitos surgieron antes de que *Homo sapiens* invadiese sus predios, de lo que cabe deducir que los neandertales desarrollaron esas tradiciones culturales por su propia cuenta, sin copiarlas de otros grupos.

Ahora, una nueva excavación en la cueva francesa ha sacado a luz más huesos y dientes de origen neandertal, así como utensilios de piedra y restos de animales. William Rendu, de la Universidad de Nueva York, y su equipo han hallado pruebas de que la fosa en la que yacía el esqueleto fue, al menos en parte, modificada para el enterramiento, por lo que no se correspondería con una oquedad completamente natural. Además, observaron que los huesos de animales habían sido roídos por carnívoros, pero no así los de neandertal. Ello indicaría que el cadáver fue cubierto con rapidez, como cabría esperar de un enterramiento deliberado. Los hallazgos de Rensu y sus colaboradores aparecieron publicados el pasado mes de diciembre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

No deja de resultar irónico que fuese el descubrimiento de La Chapelle-aux-Saints el que, a principios del siglo xx, endosara a los neandertales su reputación de brutos. Poco después del hallazgo, el paleontólogo Marcellin Boule reconstruyó el esqueleto y presentó a sus coetáneos un individuo encorvado, de andares desgarbados, rodillas dobladas, cuellicorto, con un cráneo bajo y frente huidiza. Nacía así la imagen del cavernícola de pocas luces. Más tarde se descubrió que, en realidad, se trataba de un varón envejecido aquejado de una grave artritis.

—*Kate Wong*

GETTY IMAGES (*restos neandertales*); CRISTINA SERRA (*mar Mediterráneo*)

AGENDA

CONFERENCIAS

3 de marzo
El agua regenerada: Una fuente segura
Eloy García Calvo, IMDEA Agua
Marta Vivar García, IMDEA Agua
Ciclo «El agua, ¿fuente de vida?»
Residencia de Estudiantes
Madrid
www.residencia.csic.es

6 de marzo
El quark cumple 50 años
Manuel Aguilar Benítez de Lugo, CIEMAT
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza
Zaragoza
ciencias.unizar.es/web/citaCiencia.do

7 de marzo
Del grafito al grafeno: ¿Nos hallamos en las puertas de una nueva era tecnológica basada en el carbono?
Pere Alemany Cahner, Universidad de Barcelona
Casal Marià
Olot
www.olotcultura.cat > Agenda

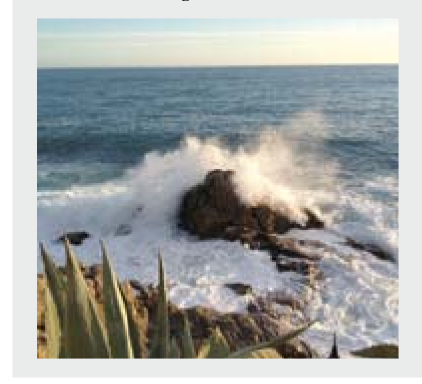
18 y 20 de marzo
Galileo Galilei: Su vida, su obra, su tiempo
José Manuel Sánchez Ron, Universidad Autónoma de Madrid
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es

EXPOSICIONES

Hablemos de drogas
Cosmocaixa
Barcelona
www.parlemdedrogues.org

OTROS

Ciclo de conferencias
Historias del Mediterráneo
CaixaForum
Palma de Mallorca
www.csic.es > Agenda



ASTROFÍSICA

Hacia el primer exoplaneta con vida

Dos ingeniosas técnicas en espectroscopía y espectropolarimetría prometen interesantes avances en la búsqueda de vida extraterrestre

PEINES DE FRECUENCIAS LÁSER

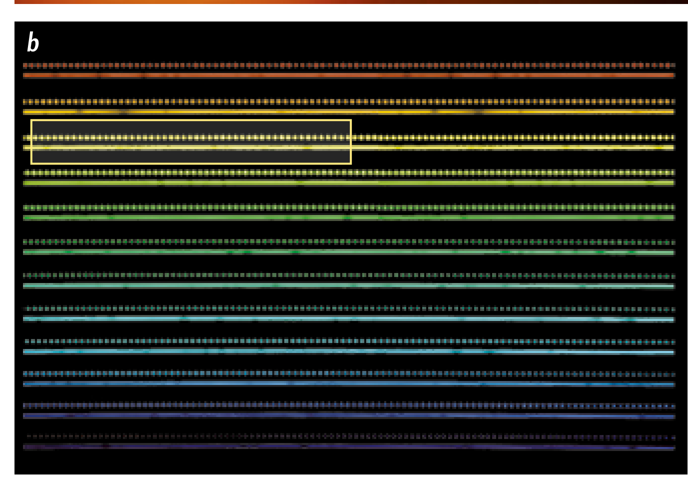
Durante los últimos años, la astrofísica ha visto crecer su interés por la espectroscopía de alta precisión. Esta técnica resulta imprescindible para buscar exoplanetas similares a la Tierra (sobre todo, aquellos situados en la zona de habitabilidad de su estrella anfitriona), así como para medir de manera directa la expansión acelerada del universo, o para estudiar la estabilidad temporal de las constantes físicas fundamentales a partir de la observación de galaxias muy lejanas.

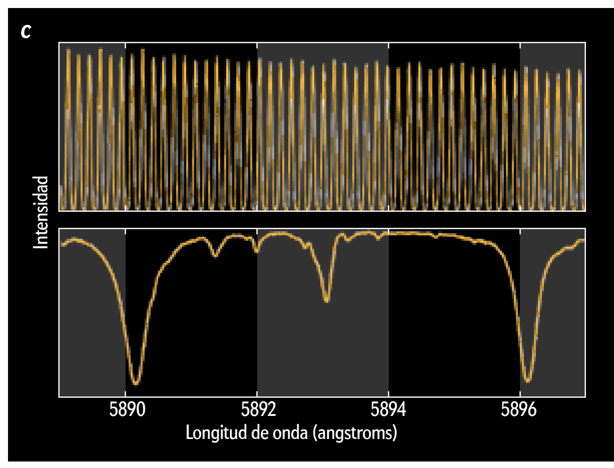
Buena parte de los planetas extrasolares conocidos hasta ahora han sido descubiertos gracias a medidas muy precisas de los ligeros vaivenes que experimenta una estrella como consecuencia de la atracción gravitatoria de un planeta cercano. Este método recibe el nombre de «técnica de la velocidad radial», ya que su objetivo consiste en medir las variaciones en la velocidad del astro a lo largo de la línea de visión desde la Tierra. Dichos cambios se observan como diminutos desplazamientos Doppler en el espectro de la estrella (las variaciones de longitud de onda que se producen cuando la fuente se acerca o aleja del observador).

La mayor parte de los más de 500 exoplanetas descubiertos hasta la fecha mediante la técnica de la velocidad radial son de gran tamaño, similares a Júpiter o Saturno. Y aunque durante los últimos años se han detectado varios semejantes a Neptuno o incluso menores, la mayoría posee períodos orbitales cortos, inferiores a 100 días; es decir, se encuentran muy próximos a su estrella anfitriona.

La técnica de la velocidad radial requiere medir con gran precisión las líneas espectrales de la estrella, lo cual exige una calibración excepcional de las longitudes de onda. Esto último también resulta necesario en las mediciones directas de la aceleración cósmica. La evolución temporal de la constante de Hubble quizá pueda evaluarse observando durante décadas los desplazamientos Doppler de las líneas de absorción del «bosque Lyman alfa» (una serie de longitudes de onda asociadas al hidrógeno) de cuásares muy distantes. Sin embargo, el cambio que cabe esperar en el ritmo de expansión del universo lejano se estima en 1 centímetro por segundo al año. Medir una variación semejante exige espectrógrafos extremadamente precisos y estables durante décadas, instalados en los telescopios del mayor diámetro posible.







PEINES ESPECTROSCÓPICOS: Representación artística de HD 75289 (*a*), una estrella similar al Sol que posee un planeta de tipo Júpiter con un período orbital de 3,5 días. La imagen espectroscópica del astro (*b*) fue obtenida con el instrumento HARPS; en ella se muestran los diferentes colores de la estrella (*líneas*) y el espectro del peine de frecuencias láser (*puntos*).La descomposición en longitudes de onda de la región sombreada (*c*) incluye el doblete de absorción del sodio (*abajo*), así como los pulsos del peine de frecuencias láser (*arriba*). La gran cantidad de pulsos proporcionados por el peine, su estabilidad y su similitud permiten medir con una precisión excepcional los vaivenes inducidos en la estrella por la presencia del planeta cercano.

THOMAS UDEM/INSTITUTO MAX PLANCK DE ÓPTICA CUÁNTICA DE GARCHING (*espectros*) Y GABRIEL PÉREZ/INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS (*HD 75289*)

Uno de los mejores espectrógrafos disponibles hoy en día es el instrumento HARPS. Instalado en el telescopio de 3,6 metros del Observatorio de La Silla, en Chile, perteneciente al Observatorio Europeo Austral (ESO), este dispositivo ha logrado descubrir numerosos planetas de tamaños diversos, desde algunos similares a Júpiter hasta supertierras y otros incluso de tipo terrestre.

Los desplazamientos Doppler inducidos en el espectro de una estrella resultan tanto más pequeños cuanto menor es la masa del planeta y cuanto más alejado se encuentra este de su estrella anfitriona. Como referencia, la Tierra induce en el Sol variaciones en la velocidad radial del orden de 9 centímetros por segundo. Si bien hasta ahora se han detectado unos diez planetas con masas similares al nuestro, todos ellos orbitan a muy poca distancia de su estrella anfitriona; la mayor parte, con períodos de menos de 10 días.

El espectrógrafo HARPS se calibra en longitudes de onda con lámparas de torio y argón, las cuales generan líneas de intensidad variable en distintas posiciones a lo largo del espectro visible. Con este sistema, la precisión del espectrógrafo se encuentra limitada a 24 centímetros por segundo en una observación individual.

Desde hace varios años, nuestro grupo del Instituto de Astrofísica de Canarias colabora con el ESO y el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, liderado por Theodor Hänsch, en el desarrollo de un nuevo sistema de calibración.

En 2005, Hänsch y John Hall, de la Universidad de Colorado y el NIST estadounidense, fueron galardonados con el premio Nobel de física por sus contribuciones a la espectroscopía de precisión mediante una nueva técnica: el peine de frecuencias ópticas [*véase* «Reglas de luz», por Steven Cundiff, Jun Ye y John Hall; Investigación y Ciencia, junio de 2008]. Tales dispositivos se caracterizan por emitir miles de frecuencias equiespaciadas sobre un ancho de banda del orden del terahercio. Tanto la frecuencia fundamental del aparato como su frecuencia de repetición (la diferencia entre dos líneas consecutivas) se encuentran sincronizadas con relojes atómicos, lo que garantiza una gran estabilidad a largo plazo. Además, la precisión de las calibraciones espectrométricas depende de la similitud entre líneas y del número de líneas disponibles, por lo que los peines de frecuencias ópticas resultan idóneos para este fin.

En un artículo publicado en mayo de 2012 en la revista *Nature*, nuestra colaboración refirió un método para acoplar con éxito la técnica de peines de frecuencias láser al espectrógrafo HARPS. Gracias a ello logramos aumentar la precisión de una imagen espectroscópica individual hasta los 6,7 centímetros por segundo, lo que mejoraba de manera considerable las prestaciones de las lámparas de calibración usuales. Además, la acumulación de varias imágenes permite reducir el ruido estadístico hasta alcanzar una precisión de 2,5 centímetros por segundo estable a corto plazo. Aunque la estabilidad a largo plazo (varios años) aún deberá ser demostrada, los resultados son alentadores.

El nuevo método de calibración se aplicó a la estrella HD 75289, un astro similar al Sol que, situado a unos 95 años luz, posee un planeta de tipo Júpiter con un período orbital de 3,5 días. Nuestros resultados demostraron que la nueva técnica ya podía emplearse de forma rutinaria en observaciones científicas.

De cara al futuro, se prevé instalar peines de frecuencias láser en otros espectrógrafos del ESO; en particular, en el instrumento ESPRESSO, que colidera nuestro grupo y que actualmente se encuentra en fase de construcción. Dicho espectrógrafo, que podrá utilizarse simultáneamente con cualquier combinación de los cuatro telescopios VLT de 8 metros del Observatorio Paranal, en Chile, se postula como el más potente para la búsqueda de exotierras en estrellas cercanas.

—Jonay I. González Hernández
y Rafael Rebolo López
Instituto de Astrofísica de Canarias

LA FIRMA BIOLÓGICA DE LA TIERRA

Las últimas dos décadas han sido testigo del descubrimiento de cientos de planetas extrasolares. Aunque en un principio la mayoría de ellos eran gigantes gaseosos, los datos de los últimos años dibujan un panorama mucho más estimulante. Hoy sabemos que los sistemas planetarios múltiples resultan muy comunes y que, desde un punto de vista estadístico, la mayoría de las estrellas posee al menos un planeta (posiblemente varios). Además, los planetas de tipo rocoso, como la Tierra o Venus, abundan más que los gigantes gaseosos.

Poco a poco nos acercamos al objetivo de detectar planetas rocosos en la zona de habitabilidad de la estrella anfitriona: la región en la que la temperatura permitiría que la superficie de un planeta albergase agua líquida. Cuando tales hallazgos sean moneda común, los esfuerzos se concentrarán en estudiar y caracterizar sus atmósferas y superficies, a fin de determinar si gozan de las condiciones adecuadas para la vida [*véase* «El amanecer de los exoplanetas», por Michael D. Lemonick; Investigación y Ciencia, septiembre de 2013].

Hoy por hoy, la mejor forma de caracterizar la atmósfera de un planeta consiste en observarlo durante un tránsito; es decir, cuando, visto desde la Tierra, el planeta pasa por delante de su estrella. Sin embargo, debido a que la probabilidad de alineación es pequeña, solo una minoría de los planetas transita. Así pues, para una caracterización generalizada de las atmósferas exoplanetarias, tendremos que detectar directamente la radiación reflejada por el planeta, la emitida por su superficie o ambas, separándolas de la luz de la estrella mediante técnicas bastante complejas (interferometría o coronografía) y aún fuera de nuestro alcance en cuanto a la precisión requerida.

Con este objetivo en mente, varias colaboraciones han propuesto estudiar la luz reflejada por la Tierra como si de un exoplaneta se tratara. En principio, para ello deberíamos alejarnos de nuestro planeta hasta que su apariencia se redujera a un punto de luz. Sin embargo, existe otra alternativa menos costosa: emplear telescopios terrestres para observar el lado oscuro de la Luna (no confundir con el lado oculto). La débil luz cenicienta que ilumina la superficie lunar no es más que radiación solar que se ha reflejado previamente en el lado diurno de la Tierra, por lo que su espectro contiene información sobre la química de la atmósfera terrestre. En definitiva, se trata de emplear la Luna a modo de espejo para observar nuestro planeta a distancia.

Esta técnica ha permitido caracterizar el espectro de reflexión de la Tierra como referencia para determinar sus principales marcadores biológicos: compuestos como oxígeno, dióxido de carbono, agua o metano. En ausencia de vida, tales gases se recombinarían, lo que implicaría la práctica desaparición de algunos de ellos. Decimos por ello que nuestra atmósfera se encuentra en «desequilibrio químico», una huella inconfundible de la presencia de actividad



¿HAY VIDA EN LA TIERRA? La luz cenicienta de la zona ensombrecida de la Luna, vista desde el Observatorio Paranal, en Chile. Dado que esa luz constituye un reflejo de la que procede del lado diurno de la Tierra, su análisis espectropolarimétrico ha permitido detectar algunos de los marcadores biológicos de nuestro planeta, así como deducir la existencia de nubes y de vegetación. La técnica augura interesantes aplicaciones para la búsqueda de vida en otros mundos.

biológica y, probablemente, la única visible desde distancias astronómicas.

Otro biomarcador de gran interés procede de la luz reflejada en la vegetación, una de las mejores pistas para inferir la existencia de formas de vida compleja. Las hojas de las plantas absorben la mayoría de la luz visible que incide sobre su superficie. Sin embargo, más allá de 700 nanómetros (justo en el límite de nuestra percepción visual), las plantas reflejan casi toda la luz solar, gracias a lo cual evitan sobrecalentarse. Este cambio brusco en el albedo recibe el nombre de «escalón rojo» y constituye un rasgo que puede detectarse en el espectro global de la Tierra cuando se observan extensas zonas boscosas, como el Amazonas.

En un artículo publicado en marzo de 2012 en la revista *Nature* junto con Michael F. Sterzik, del ESO, y Stefano Bagnulo, del Observatorio de Armagh, referimos nuevas mediciones de esa luz cenicienta. En ellas empleamos observaciones espectropolarimétricas, una técnica para analizar el brillo de los distintos colores del espectro —como se venía haciendo hasta ahora— pero que, además, permite medir la polarización de la luz; es decir, el plano en el que oscila su campo electromagnético.

Por lo general, la luz emitida por el Sol u otras estrellas no se encuentra polarizada; todas las direcciones de oscilación aparecen con probabilidades parejas. Sin embargo, cuando la luz solar se refleja en un planeta, parte de ella puede polarizarse. El grado de polarización depende de las propiedades físicas de la superficie, así como de ciertos procesos de dispersión múltiple, como los que tienen lugar en las nubes. Estos fenómenos ópticos provocan que las distintas regiones terrestres (océanos, bosques o desiertos) y los gases que componen nuestra atmósfera dejen sus huellas en el espectro de polarización.

La técnica mencionada permite caracterizar de manera más precisa la composición de la atmósfera y la superficie de un planeta, incluidos los posibles biomarcadores, delatores de vida. En nuestro caso, a partir únicamente de las observaciones espectropolarimétricas y su comparación con los modelos (en particular, sin usar ninguna información relativa a la composición de la Tierra), pudimos deducir que la atmósfera terrestre es parcialmente nubosa, que parte de la superficie del planeta se encuentra bañada por océanos y que grandes extensiones continentales se hallan cubiertas de vegetación.

La espectropolarimetría esquivará algunos de los obstáculos principales que plagan el estudio de las huellas químicas de los planetas extrasolares. En particular, ahorrará una parte del desarrollo instrumental necesario, puesto que no se requerirá separar la luz del planeta de la procedente de la estrella.

Dado que el flujo de luz emitido por una estrella resulta varios millones de veces mayor que el reflejado por el planeta, detectar la polarización inducida por este último exigirá recolectar enormes cantidades de luz. Por tanto, la técnica requerirá el uso de algunas de las grandes instalaciones telescópicas futuras, como el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), cuya construcción en el cerro Armazones, en Chile, se prevé que concluya en la década de 2020.

—Enric Palle
Instituto de Astrofísica de Canarias

MATERIALES

Ventanas inteligentes que modulan la luz solar

Un nuevo material compuesto que absorbe de forma selectiva y reversible la radiación visible e infrarroja podría mejorar la eficiencia energética de los edificios

En Estados Unidos, cerca del 40 por ciento de la energía consumida y alrededor del 30 por ciento de la energía relacionada con emisiones de carbono se contabiliza en edificios residenciales y comerciales. Para reducir esta demanda energética, se necesitan materiales capaces de interaccionar con la radiación solar que entra por las ventanas, de modo que puedan regularse la iluminación y la temperatura según las condiciones ambientales. En concreto, ventanas con recubrimientos electrocrómicos (que cambian de color, transparencia o ambos, cuando se hallan sometidos a un campo eléctrico) podrían reducir de forma notable el consumo de energía en edificios [*véase* «Materiales electrocrómicos», por Roger J. Mortimer; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013].

El pasado mes de agosto, Anna Llordés, del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y sus colaboradores publicaron un gran avance en el desarrollo de dichos materiales. Este equipo ha creado un material compuesto (*composite*), a base de nanocristales de óxido de indio dopa-

do con estaño (OIE) embebidos en una matriz amorfa de óxido de niobio (vidrio de NbO_x), que absorbe de forma selectiva radiación solar visible e infrarroja. Las prestaciones electrocrómicas de este material son mucho mejores que las que ofrecería la simple suma de los dos componentes por separado; ello se debe a reordenamientos estructurales e interacciones sinérgicas en la interfase entre los nanocristales y la matriz.

Los nanocristales inorgánicos, sintetizados por métodos químicos coloidales, suelen contener moléculas orgánicas (ligandos) en la superficie. Este recubrimiento permite dispersar y estabilizar los nanocristales en disolventes, evitando su agregación y crecimiento indeseado. Sin embargo, estos ligandos no confieren las propiedades eléctricas y ópticas requeridas en muchas aplicaciones. De ahí que numerosos investigadores se hayan esforzado en reemplazar estas moléculas orgánicas por otras inorgánicas. El interés de los ligandos inorgánicos es doble: por un lado, añaden funcionalidad a los nanocristales; por otro, pueden ser convertidos en materiales activos (eléctrica y ópticamente). Esta estrategia se ha utilizado para ensamblar nanocristales con propiedades eléctricas mejoradas y para aumentar la eficiencia de materiales fotovoltaicos (los que convierten la luz en electricidad).

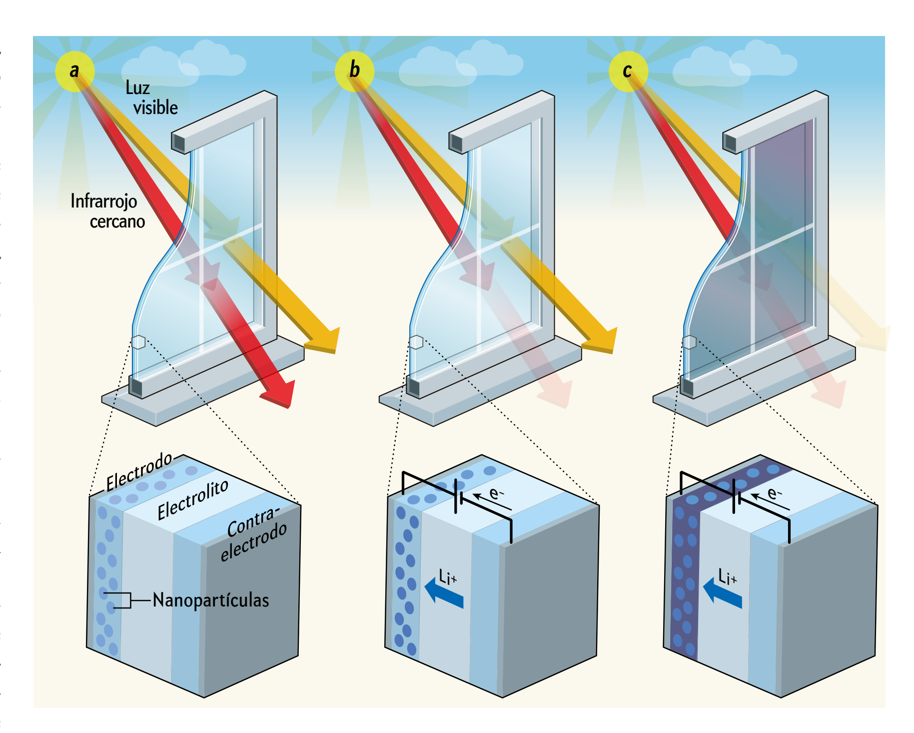
El equipo de Llordés ha usado ese mismo enfoque para crear su material compuesto. Denominado nanocristal-en-vidrio, consta de nanocristales de OIE dispersados y enlazados químicamente a una matriz amorfa de NbO_x que los rodea. Se eliminan primero las moléculas orgánicas de la superficie de los nanocristales y se reemplazan por polioxometalatos, moléculas inorgánicas (*clusters*) que contienen niobio. Estos agregados se enlazan de forma covalente a la superficie de los nanocristales, creando una carcasa alrededor del nanocristal. Luego, se depositan en un sustrato (vidrio conductor, por ejemplo) las dispersiones que contienen los nanocristales y polioxometalatos, y se evapora el disolvente. Se obtiene así una capa homogénea de material compuesto sólido. Finalmente, se aplica un tratamiento térmico a 400 ºC, en el que los polioxometalatos condensan y se convierten en una matriz de óxido de niobio que rodea y permanece enlazada a los nanocristales.

En comparación con otras técnicas estándar para la síntesis de materiales compuestos, en las que los nanocristales se forman en la matriz amorfa (vidrio), el método de Llordés y sus colaboradores ofrece una gran versatilidad. Permite un excelente control sobre el tamaño de los nanocristales y su fracción de volumen, puesto que son sintetizados separadamente de la matriz amorfa. Asimismo, mediante la adición de más polioxometalato a la dispersión, puede aumentarse la fracción de volumen de la matriz.

Una de las características clave del OIE-NbO_x es que la matriz amorfa de NbO_x se halla enlazada covalentemente a los nanoscristales. Ello restringe las orientaciones moleculares disponibles para las unidades octaédricas NbO_6 de la matriz, lo que conlleva una remarcable reorganización estructural que mejora las propiedades electrocrómicas de esta. En el material compuesto, la matriz presenta un contraste óptico (en el rango del espectro visible) cinco veces mayor que en el material puro —cuando se aplica el mismo voltaje.

Los nanocristales de OIE también son electrocrómicos, pero en una región del espectro solar diferente: en concreto, en el infrarrojo cercano. Experimentan la siguiente reacción electroquímica reversible: cuando son reducidos, absorben radiación infrarroja; cuando son oxidados, se vuelven transparentes a ella. Mediante la combinación de los nanocristales OIE con la matriz amorfa de NbO_x se obtiene, por tanto, un material multifuncional en el cual la absorción de luz visible e infrarroja puede ser modulada electroquímicamente. Este material podría usarse en ventanas inteligentes para controlar la cantidad de calor (radiación infrarroja) y luz que los atraviesan. Asimismo, la transparencia óptica puede ser controlada independientemente de la transparencia infrarroja.

La ruta que Llordés y sus colaboradores han desarrollado para sintetizar este tipo de materiales compuestos abre el camino a una gran variedad de nuevas propiedades, funcionalidades y aplicaciones, más allá del campo de los electrocrómicos. El reto en cada aplicación consistirá en identificar las mejores combinaciones de nanocrista-



UN MATERIAL COMPUESTO basado en nanocristales-en-vidrio podría ser utilizado para construir ventanas que absorban luz visible e infrarroja cercana (calor) de manera selectiva y reversible. En este diseño, la ventana opera como una celda electroquímica en la que dos paneles de vidrio conductor se hallan separados por un electrolito sólido (*a*). El material compuesto se deposita en uno de los paneles, formando un electrodo; en el otro se deposita un contraelectrodo. En ausencia de voltaje, la ventana es transparente a la luz visible y la infrarroja. Al aplicar un potencial intermedio (*b*), las cargas libres (iones litio, Li^+, y electrones, e^-) se mueven a través del circuito; los nanocristales ven reducido su estado de oxidación, con lo cual bloquean gran parte de la luz infrarroja que incide en ellos. A voltajes inferiores (*c*), la matriz amorfa también se reduce, bloqueando en este caso la luz visible.

les y agregados inorgánicos que se enlacen a la superficie de los primeros.

Sin embargo, deben superarse varias dificultades antes de que el material pueda ser usado en ventanas. Por un lado, para evaluar el rendimiento del material compuesto los autores del estudio usaron litio como contraelectrodo, lo cual no sería aceptable para aplicaciones comerciales, por motivos de seguridad. Debe, por tanto, encontrarse un contraelectrodo más adecuado. Por otro lado, en los experimentos electroquímicos usaron un electrolito líquido como material de transporte de los iones litio, mientras que para su aplicación en edificios probablemente es más apropiado un electrolito sólido. Además, los materiales que se necesitarán para construir una ventana electrocrómica serán más caros que los utilizados en la fabricación de las ventanas al uso. El gasto extra deberá ser contrarrestado por el ahorro energético y económico que se puede alcanzar mediante su uso. En teoría, no se requerirá el aporte de electricidad para mantener el estado electrocrómico del material (transparencia u opacidad), pero esta propiedad todavía debe explorarse.

Con todo, los resultados de Llordés y sus colegas son prometedores. Con un contraelectrodo apropiado, un electrolito sólido y una estabilidad a largo plazo, las ventanas con transparencia espectral multibanda podrían estar a la vuelta de la esquina. Unas ventanas inteligentes que conferirían a los edificios una eficiencia energética y un confort sin precedentes.

—Brian A. Korgel
Departamento de ingeniería química
Universidad de Texas en Austin

Artículo original publicado
en *Nature* 500 págs. 278-279, 2013.
Traducido con el permiso

BIOLOGÍA EVOLUTIVA

Nuevo mecanismo de creación de especies

Se describe una nueva forma de especiación a través de la relación entre un animal y los microorganismos residentes en su intestino

El proceso de especiación, por el que un linaje se divide en dos acervos génicos independientes, tiene su origen en el desarrollo de barreras en el flujo génico, las cuales mantienen diferencias en las poblaciones cuando estas se hallan en contacto. El flujo puede reducirse por numerosas causas, como la incapacidad de apareamiento, la incompatibilidad entre espermatozoide y óvulo o la producción de híbridos estériles o inviables. Brucker y Bordenstein han descrito en el número de agosto de 2013 de la revista *Science* una nueva forma de aislamiento reproductivo: la influencia de microorganismos residentes en los intestinos sobre la supervivencia de los híbridos.

La idea de que los microorganismos contribuyen al aislamiento reproductivo no resulta nueva. En los años noventa del siglo XX se descubrió que la escasa supervivencia de los descendientes híbridos de dos especies de avispas estrechamente emparentadas se asociaba a la presencia en los progenitores de la bacteria *Wolbachia*. En tiempo más reciente, se ha demostrado que los cambios inducidos por el ambiente en la composición de la microbiota intestinal podrían repercutir en la elección de pareja en *Drosophila*, la mosca del vinagre. Asimismo, el trabajo de Brucker y Bordenstein ha examinado el papel de la microbiota intestinal en el aislamiento reproductivo, pero se ha centrado en la muerte de larvas híbridas y no en la elección de pareja, además de estudiar una situación en la que la cantidad de microorganismos del entorno se mantiene constante.

Interacciones disfuncionales

El estudio se ha realizado en avispas parásitas del género *Nasonia*, que ponen sus huevos en las pupas de moscas de las familias Sarcofágidos (moscas grises de la carne) y Múscidos (moscas domésticas). El huésped representa a la vez una fuente de alimento y un foco ambiental de microbios; los autores ya habían establecido previamente que diferentes especies de *Nasonia* adquirían comunidades diferentes de microorganismos (su microbiota intestinal) a partir de la misma población microbiana ambiental. Tal diferenciación guardaba relación con la filogenia del huésped: los microbiomas de las especies *Nasonia giraulti* y *Nasonia longicornis*, estrechamente emparentadas, se asemejaban más entre sí que a los de una especie más alejada, *Nasonia vitripennis*. Brucker y Bordenstein han planteado la hipótesis de que esta diferenciación podría promover la aparición de interacciones disfuncionales entre los híbridos y su microbiota intestinal.

Para comprobar dicha idea, los autores examinaron los descendientes masculinos formados por cruzamientos entre *N. vitripennis* y *N. giraulti*, la mayoría de los cuales muere durante el desarrollo larvario. Advirtieron que las larvas que perecían estaban melanizadas, una característica de las patologías microbianas. Además, la microbiota intestinal de las larvas híbridas estaba dominada por la bacteria *Proteus mirabilis*, a diferencia de las especies parentales, que albergan sobre todo especies de *Providencia*. Al manipular la exposición de las larvas a las bacterias, los investigadores establecieron que la presencia de microorganismos intestinales se asociaba a la enfermedad y muerte de los híbridos: las larvas tenían una eficiencia biológica casi normal cuando se las criaba a base de una dieta carente de bacterias, pero su viabilidad se reducía cuando en el medio de cultivo se introducía *Proteus* y *Providencia* juntas o cuando se añadía la última sola. La mortalidad de los híbridos volvía a aumentar cuando en el medio estéril se introducía *Escherichia coli*, bacteria que no suele residir en el intestino de estas avispas. De manera intrigante, los autores descubrieron también que varias combinaciones de variantes génicas en el genoma del huésped, las cuales se habían relacionado con una inviabilidad de los híbridos, se hallaban presentes en proporciones hereditarias normales en larvas criadas con una dieta sin bacterias.

Híbridos inviables

Estos hallazgos demuestran que la inviabilidad de los híbridos guarda relación con una interacción alterada entre huésped y microbiota. De hecho, hay razones para creer que la implicación de microorganismos simbióticos en el aislamiento



FUENTE DE ALIMENTO Y DE BACTERIAS. Esta micrografía electrónica de barrido muestra una avispa *Nasonia vitripennis* mientras pone sus huevos en la ninfa de una mosca gris de la carne, *Sarcophaga bullata*. Los huevos (*azul*) hacen eclosión unas 24 horas después de haber sido puestos; las larvas (*púrpura*) permanecen bajo la envuelta externa de la ninfa durante unos nueve días y utilizan a la mosca como fuente de alimento. Se ha demostrado que las bacterias adquiridas durante la alimentación, normalmente simbióticas con la avispa, pueden matar a las larvas de avispa híbridas.

reproductivo resulta común. En primer lugar, la microbiota afecta al desarrollo y a la función del organismo, lo que tal vez suceda en todas las especies que poseen tubo digestivo. En segundo lugar, la divergencia entre linajes en la interacción entre huésped y microbiota se ha observado en numerosas ocasiones; esta constituye el requisito básico para la disfunción de los híbridos. Así, los cambios de dieta alteran los microbios a los que una especie se halla expuesta y los que medran en su intestino. Las diferentes características de los microorganismos y los diversos servicios que proporcionan al huésped pueden crear presiones selectivas que modifican los sistemas de los húespedes. Además, los cambios evolutivos en estos últimos pueden hacer variar la constitución de la microbiota. En resumen, existen buenas razones para creer que la asociación entre huésped y microbiota divergirá con el tiempo por ambos lados, de manera que la hibridación puede originar combinaciones que funcionen mal.

Brucker y Bordenstein habían ampliado con anterioridad el concepto de interacciones genéticas responsables de la disfunción de los híbridos (las incompatibilidades de Bateson-Dobzhansky-Muller) para incluir las posibles incompatibilidades entre los genomas del huésped y de su microbiota. Pero los experimentos de reintroducción de bacterias en el presente estudio sugieren que, aunque la inviabilidad de los híbridos de *Nasonia* se debe a la disparidad entre las bacterias intestinales, esta no depende de la identidad concreta de los microbios (y, por tanto, tampoco de sus características genéticas). Parece, más bien, que los híbridos de *Nasonia* regulan mal la interacción biótica tal vez más importante y universal: el desarrollo y control de su microbiota. Este fallo hace pensar en otros ejemplos en los que las interacciones bióticas dan lugar a híbridos inviables. En las mariposas del género *Heliconius*, las especies emparentadas entre sí divergen para tener colores de advertencia distintos que reducen la depredación por las aves, pero los híbridos exhiben una coloración distinta que no es reconocida. Ello lleva a un aumento de la depredación, lo que representa una forma de inviabilidad «extrínseca» de los híbridos.

El trabajo de Brucker y Bordenstein plantea varias cuestiones. ¿Cuántos casos de inviabilidad de los híbridos se deben a un mal funcionamiento de la asociación entre el huésped y su microbiota? ¿Pueden los cambios de dieta guiar la divergencia evolutiva de esa asociación y contribuir así al desarrollo del aislamiento reproductivo? Quizá más interesante es la idea de la posible interacción con componentes específicos del microbioma en los híbridos. De ser así, el microbioma ampliaría la red de interacciones posibles dentro de un organismo y podría acelerar la aparición de incompatibilidades. Sin lugar a dudas, la biología evolutiva de las relaciones estrechas y complejas entre animales y microbios constituirá un tema candente en los años venideros.

—Gregory D. D. Hurst
Instituto de Biología Integrativa
Universidad de Liverpool
—Chris D. Jiggins
Departamento de zoología
Universidad de Cambridge

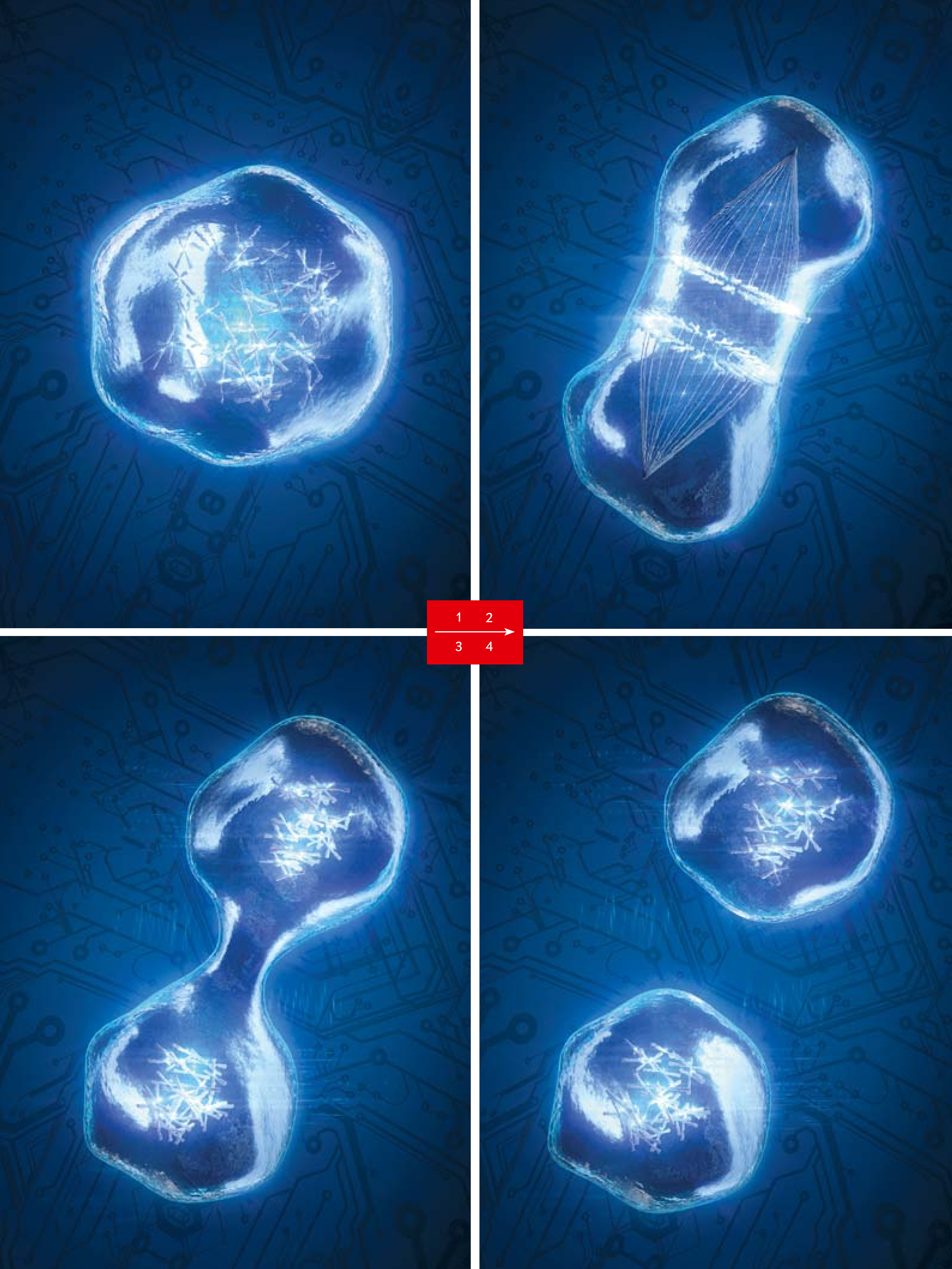
Artículo original publicado en *Nature* 500, págs. 412-413, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013



Al crear el primer modelo informático de un organismo unicelular, los biólogos están desarrollando una nueva y potente herramienta para descifrar el funcionamiento de la vida

Markus W. Covert

ANDRÉ KUTSCHERAUER


1 2
3 4

Markus W. Covert es profesor de ingeniería en la Universidad Stanford, donde dirige un laboratorio dedicado a la biología de sistemas.



LA IDEA FUNDAMENTAL SE ME OCURRIÓ CUANDO REGRESABA en bicicleta desde el trabajo hasta mi casa. Era el día de San Valentín de 2008. Mientras pedaleaba, reflexionaba sobre un problema que me ha ocupado a mí y a otros investigadores durante más de una década. ¿Existe alguna manera de simular la vida en un programa informático que abarque la extraordinaria y misteriosa complejidad bioquímica que la hace funcionar?

Un modelo informático de las células vivas, aunque resultara poco preciso, constituiría una herramienta muy útil. Los biólogos podrían poner a prueba sus ideas sobre experimentos antes de invertir tiempo y dinero en llevarlos a cabo en el laboratorio. Los diseñadores de medicamentos podrían acelerar la búsqueda de nuevos antibióticos centrándose en moléculas cuya inhibición afectase al máximo a una bacteria. Los bioingenieros podríamos trasplantar y empalmar genes de organismos virtuales para diseñar cepas modificadas con rasgos especiales (como la emisión de luz fluorescente cuando son infectadas por cierto virus o la capacidad de extraer hidrógeno gaseoso del petróleo) sin los riesgos asociados a la manipulación de microbios reales. A la larga, si lográramos crear modelos lo suficientemente complejos como para simular células humanas, estos podrían transformar la investigación médica. Permitirían llevar a cabo estudios que en la actualidad resultan irrealizables porque muchos tipos de células humanas no pueden crecer en cultivos.

Pero sin un método que desentrañase la red de reacciones químicas y las conexiones físicas que hacen funcionar a las células vivas, todo ello parecía un sueño imposible. Numerosos intentos previos, realizados por nuestro laboratorio de la Universidad Stanford y otros grupos, se encontraron con obstáculos insalvables o fracasaron por completo.

Pero mientras pedaleaba a través del campus aquella tarde de invierno, pensé en nuestro trabajo reciente sobre el registro de imágenes y vídeos de organismos unicelulares. Y entonces se me ocurrió una manera de crear un simulador realista y funcional. A partir de uno de los microorganismos unicelulares más simples, como la bacteria *Mycoplasma genitalium*, tal vez se pudiera construir un modelo de un microorganismo. Limitar la simulación a tan solo una célula podría simplificar el programa, lo que en un principio nos permitiría incluir en él cada pequeña información acerca de la biología de esa célula: el desdoblamiento de la molécula de ADN, la transcripción de un mensaje de ADN en una copia de ARN, la síntesis de enzimas y otras proteínas según las instrucciones del ARN, y las interacciones entre cada uno de esos actores y otros muchos, todos los cuales contribuyen a que la célula crezca y finalmente

EN SÍNTESIS

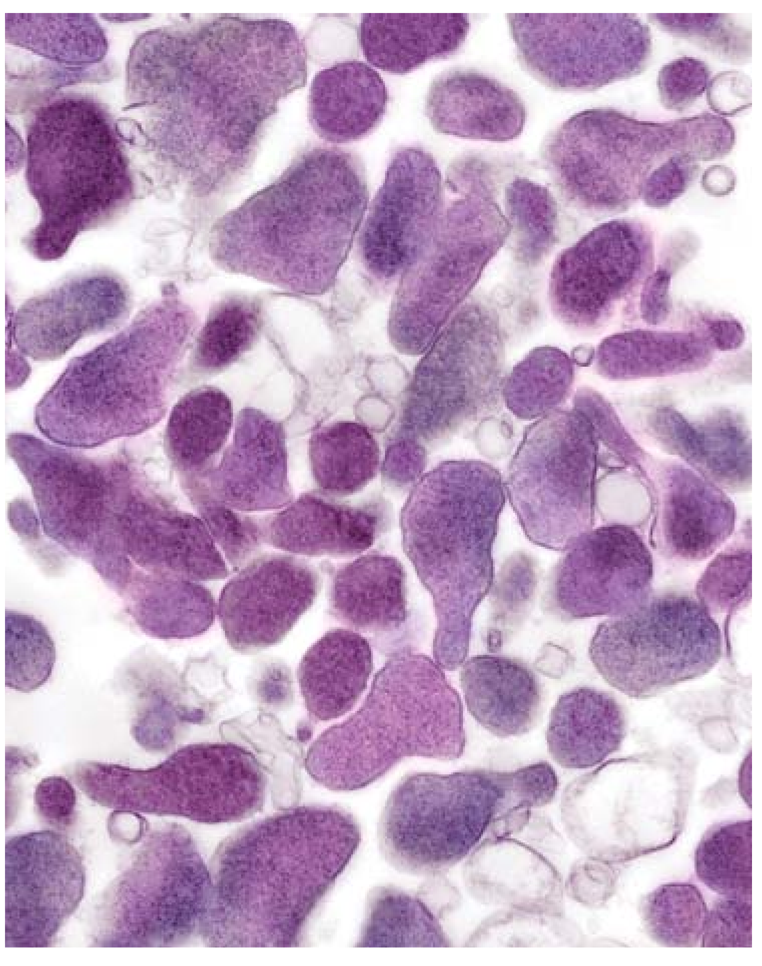
Los modelos informáticos que incorporan la función de cada gen y molécula de una célula podrían revolucionar la manera en la que estudiamos, entendemos y diseñamos los sistemas biológicos.

El año pasado se logró la simulación de una bacteria infecciosa común. Aunque es incompleta, ya está dando lugar a nuevos descubrimientos.

En la actualidad se están construyendo modelos de organismos más complejos. A largo plazo, se pretende simular, con un nivel de detalle parecido, células humanas y órganos.

Hitos en la modelización celular

El largo camino hasta el primer modelo funcional que el autor hizo de una especie unicelular, la bacteria *Mycoplasma genitalium*, está precedido de los esfuerzos teóricos, genéticos y de modelización de otros investigadores. Crear un modelo para una célula humana resultará sin duda más difícil todavía, dada la mayor complejidad de las células de los mamíferos. Las humanas contienen casi 40 veces más genes. Estos se hallan empaquetados en grupos de cromosomas, que son mucho más intrincados en su estructura física y en los patrones de información que contienen. Abajo a la derecha se indican algunos de los pasos previos que deberán realizarse.



LA BACTERIA *Mycoplasma genitalium* (*cuerpos violáceos*) es una de las formas de vida más sencilla. Sin embargo, la modelización de su ciclo biológico no fue tarea fácil.

1967

Francis Crick y Sydney Brenner formulan y proponen «El proyecto K: La solución completa de *E. coli*», un esfuerzo por entender el «diseño» de esta bacteria intestinal. Describen detalles sobre su genética, procesamiento de energía y reproducción.

1984

Harold Morowitz, a la sazón en la Universidad Yale, esboza un plan para secuenciar y después modelizar una bacteria del género *Mycoplasma*.

1984

Un equipo liderado por Michael Shuler, de la Universidad Cornell, presenta un modelo informático que incluye ecuaciones diferenciales para abordar la mayor parte de los procesos biológicos implicados en el crecimiento de una célula de *Escherichia coli*. El modelo no contemplaba la actividad de los genes porque el genoma de *E. coli* aún no había sido secuenciado.

1989-1990

Bernhard Palsson, de la Universidad de Michigan, publica un modelo exhaustivo del metabolismo de los eritrocitos humanos que incluye los efectos de la variación del pH y una baja concentración de glucosa en sangre.

1995

J. Craig Venter, del Instituto de Investigación Genómica, y sus colaboradores completan la secuenciación del genoma de *M. genitalium*.

1999

Masaru Tomita y sus colaboradores, de la Universidad Keio, construyen E-Cell, un sistema de modelización celular basado en ecuaciones diferenciales que incluye 127 genes, la mayoría de ellos de *M. genitalium*.

2002

La Alianza de la Señalización Celular, una gran red de colaboración formada por unos 50 investigadores, emprende un ambicioso proyecto de 10 años, financiado con 10 millones de dólares, para modelizar linfocitos B y cardiomiocitos de ratón. Se generan algunos datos prometedores, pero los linfocitos B resultan difíciles de manipular en cultivo.

2002

Palsson, George Church, de la Universidad Harvard, y Covert, junto con otros, finalizan un modelo a escala genética del metabolismo de *Helicobacter pylori*, una bacteria que infecta a los humanos y causa úlceras y cáncer de estómago.

2004

Palsson y Covert, junto con tres investigadores más, publican un modelo informático de los 1010 genes implicados en la regulación del metabolismo y la transcripción del ADN de *E. coli*; demuestran que el modelo predice con exactitud los resultados experimentales en una bacteria real.

2012

Covert y sus colaboradores publican un modelo de una célula de *M. genitalium*; por primera vez se simulan todos los genes y procesos bioquímicos conocidos en un organismo que se reproduce por sí mismo.

2013

Covert y sus colaboradores demuestran que el modelo predice con exactitud la actividad de varias enzimas.

PRÓXIMOS PASOS:

- Obtener el modelo celular de una bacteria más corriente y mejor estudiada, como *E. coli*.
- Modelizar un eucariota unicelular, como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. En los eucariotas, el ADN está empaquetado dentro de un núcleo rodeado por una membrana; no flota libremente como lo hace en una bacteria.
- Construir un modelo de una célula animal que pueda cultivarse fácilmente, tal como un macrófago (una célula del sistema inmunitario) de ratón.
- Crear un primer boceto de modelo para una célula humana (quizá también un macrófago).
- Modelizar otros tipos de células humanas, en especial aquellas con un papel más importante en enfermedades comunes.

SCIENCE SOURCE

se divida en dos. La simulación reproduciría, a partir de unos principios básicos, toda la vida de un organismo unicelular.

Los intentos previos de simulación se habían realizado siempre sobre colonias de células, porque los datos del comportamiento celular procedían casi siempre de poblaciones, no de individuos. Sin embargo, los avances en biotecnología e informática empezaban a hacer más fácil el estudio de células individuales. Me di cuenta de que se hallaban a nuestro alcance nuevas técnicas para intentar un enfoque diferente.

Las ideas se agolpaban en mi cabeza. En cuanto llegué a casa, empecé a esbozar un plan sobre un simulador. Al día siguiente, escribí el código para un par de los numerosos procesos que tienen lugar en un microorganismo vivo. En una semana, había completado varios prototipos de módulos; cada uno era una representación informática de un proceso celular concreto. Los módulos producían resultados que parecían bastante realistas.

Enseñé el trabajo a otros biólogos, la mayoría de los cuales no se lo tomaron en serio. Pero yo sentía que estaba sobre la pista de algo

Enseñé el trabajo a otros biólogos, la mayoría de los cuales no se lo tomaron en serio. Pero yo sentía que estaba sobre la pista de algo y dos doctorandos audaces y excepcionales, Jonathan R. Karr y Jayodita C. Sanghvi, vieron suficiente potencial en la idea como para colaborar conmigo en el proyecto.

El desarrollo del modelo significaría crear docenas de estos módulos, revisar cerca de mil artículos científicos para recopilar datos bioquímicos y usar esos valores para delimitar y afinar miles de parámetros, tales como la fuerza de unión de las enzimas con sus moléculas diana o la frecuencia con que las proteínas de lectura del ADN se desplazan unas a otras en la doble hélice. Sospeché que, incluso con la ayuda de colaboradores, el proyecto duraría años, pero también intuí que llegaría a buen fin. Intentarlo era la única manera de salir de dudas.

UN GRAN RETO

Cuando nos propusimos esta labor formidable, nos inspiramos en los investigadores que soñaron en modelizar la vida por primera vez. En 1984, Harold Morowitz, entonces en la Universidad Yale, sentó las bases generales de esa idea. Pensó que lo más razonable sería comenzar por la bacteria más simple que se podía cultivar, los micoplasmas. Además de presentar un tamaño reducido y una estructura sencilla, dos especies de *Mycoplasma* causan enfermedades en los humanos: el parásito *M. genitalium*, que se transmite sexualmente y se desarrolla en los tractos vaginales y urinarios, y *M. pneumoniae*, que causa neumonía atípica. Un modelo de cualquiera de estas especies podría resultar útil en medicina y proporcionar nuevas ideas sobre su biología básica.

El primer paso, propuesto por Morowitz, consistiría en secuenciar el genoma del microbio elegido. J. Craig Venter y sus colaboradores del Instituto de Investigación Genómica (TIGR, por sus siglas en inglés) lo hicieron para *M. genitalium* en 1995, que solo posee 525 genes (las células humanas cuentan con más de 20.000).

Cuatro años más tarde, mientras realizaba mi doctorado en San Diego, el equipo del TIGR concluyó que tan solo unos 400 de esos genes eran esenciales para mantener la vida (siempre y cuando los microbios crecieran en un medio de cultivo adecuado). Venter y sus colaboradores fundaron Celera y compitieron con el Gobierno federal en la secuenciación del genoma humano. Sintetizaron los genes fundamentales de una especie de *Mycoplasma* y demostraron que funcionaban en una célula.

Para mí y otros jóvenes biólogos de finales de los años noventa, ese equipo era como Led Zeppelin, un grupo de personalidades extraordinarias e iconoclastas que tocaban una música que nunca antes habíamos escuchado. Clyde Hutchinson, uno de los biólogos del grupo de Venter, dijo que la prueba definitiva sobre el conocimiento de las células simples llegaría cuando alguien las modelizara en un ordenador. Se puede construir una célula funcional en el laboratorio, combinando distintas piezas, sin conocer cada detalle ni cómo encajan las unas con las otras. Pero no sucede así en los programas informáticos.

Morowitz también abogó por la creación de un simulador celular basado en los datos genómicos de *Mycoplasma*. Argumentó que cada experimento que podía hacerse en un laboratorio también podía realizarse en un ordenador. El grado de semejanza entre los resultados de experimentos y de simulaciones refleja el alcance de nuestro conocimiento en biología molecular (nuestra teoría actual sobre cómo interaccionan el ADN y otras biomoléculas de la célula para producir la vida tal y como la conocemos). Dicho de otro modo, mientras reconstruimos el rompecabezas, se vuelven aparentes las piezas y las interacciones que faltan en nuestra teoría.

Aunque los secuenciadores de alto rendimiento y el equipamiento robótico de los laboratorios han acelerado enormemente la búsqueda de las piezas que faltan, el sinfín de secuencias de ADN y patrones de actividad genética que generan no vienen acompañados de un manual que explique cómo encajan las partes. El genético Sydney Brenner ha llamado a este trabajo biología de «baja inversión, alto rendimiento y ninguna ganancia», porque a menudo los experimentos carecen de hipótesis y ofrecen escasa información sobre los principales sistemas que hacen posible, o imposible, la vida.

Esta situación explica en parte por qué, a pesar de los titulares que periódicamente proclaman el descubrimiento de nuevos genes asociados al cáncer, la obesidad o la diabetes, las curas para estas enfermedades siguen mostrándose escurridizas. Parece que los tratamientos llegarán solo cuando desentrañemos las docenas, o incluso centenas, de factores que interaccionan, a veces de modo inesperado, para causar la enfermedad.

Los pioneros en la modelización celular comprendieron que las simulaciones que incluían todos los componentes de las células y sus redes de interacción constituirían un instrumento

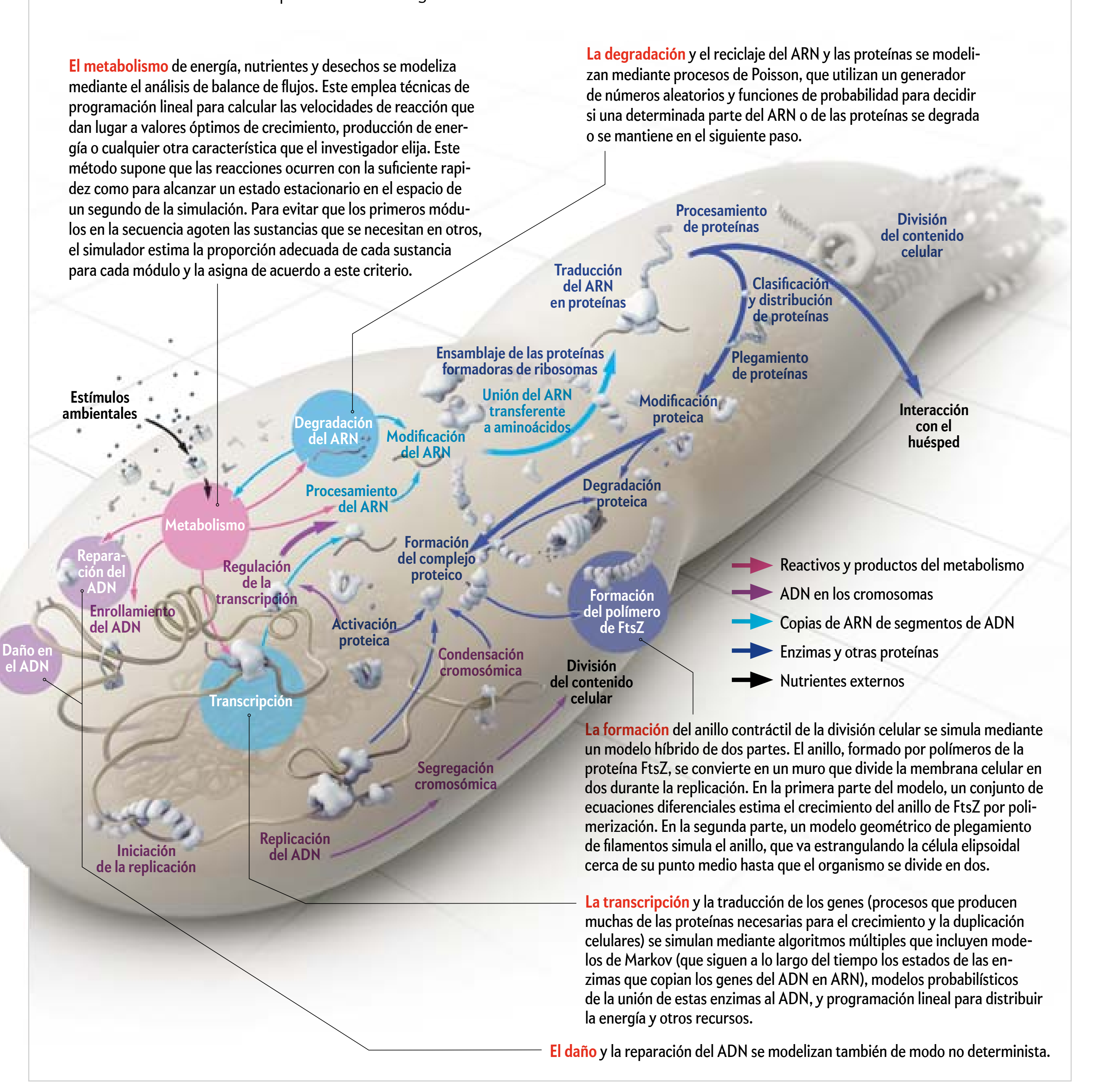
AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO (*ilustración*); FUENTE: «A WHOLE-CELL COMPUTATIONAL MODEL PREDICTS PHENOTYPE FROM GENOTYPE», DE JONATHAN R. KARR ET AL., EN *CELL*, VOL. 150, N.º 2, 20 DE JULIO DE 2012

La simulación en marcha

El modelo informático de la bacteria infecciosa *Mycoplasma genitalium*, desarrollado por el autor de este artículo, representa casi todos los aspectos de la vida, crecimiento y multiplicación de este microbio. Ninguna aproximación matemática puede simular todas las funciones biológicas de la célula, por lo que estas se dividen en 28 módulos, que intervienen en el procesamiento del ADN (*morado*), del ARN (*azul claro*), de las proteínas (*azul oscuro*), y de la energía, nutrientes y desechos (*rosa*). Para cada módulo, se seleccionó el método matemático más apropiado; abajo se destacan varios ejemplos.

El programa comienza con la ejecución de todos los módulos en una secuencia aleatoria para simular un segundo de tiempo real. Muchos de los valores introducidos se extraen de una gran tabla de variables que representa sus estados iniciales; otros toman un valor aleatorio dentro de un intervalo o se rigen por una distribución de probabilidad. Alterando la configuración inicial se pueden simular diferentes situaciones.

Tras el primer paso de tiempo (un segundo), el programa actualiza la tabla de estado para reflejar los resultados de los módulos. La secuencia se ejecuta de nuevo para otro segundo, actualiza la tabla del estado celular, y así sucesivamente. El bucle continúa hasta que la célula se divide o muere, o hasta que la simulación se alarga más allá de la longevidad real de las células.



Predecir el comportamiento de una célula

Un modelo para una nueva especie, *Mycoplasma pneumoniae*, tal vez permita augurar la respuesta de un organismo ante cambios ambientales y genéticos

MARIA LLUCH SENAR

Hace diez años, cuando empecé a trabajar con *Mycoplasma*, sentía fascinación por el modo en que unos microorganismos que podían vivir fuera de una célula huésped, sin pared celular y con genomas tan reducidos, realizaban funciones vitales y complejas, como metabolizar nutrientes o regular la expresión génica, entre otras. Además, algunos de los miembros de la familia, como *M. genitalium* y *M. pneumoniae*, causan enfermedades comunes en humanos, como la uretritis y la neumonía atípica, respectivamente, males no muy graves pero que pueden provocar complicaciones importantes en pacientes inmunodeprimidos. Pese a la aparente simplicidad de estas bacterias, las conexiones entre los diferentes procesos que les permitían desempeñar estas funciones seguían siendo un misterio en aquel tiempo.

En 2007, en nuestro laboratorio dirigido por Luis Serrano, del Centro de Regulación Genómica, se planteó la siguiente pregunta: si lográsemos cuantificar todas las proteínas y reacciones metabólicas y definir las funciones de todos los genes que constituyen el genoma de un organismo, ¿podríamos integrar toda esta información en un modelo matemático que permitiese representar en un ordenador el comportamiento de la célula y predecir su respuesta frente a diferentes perturbaciones?

La era de las técnicas «-ómicas» supuso una revolución en la obtención de información cuantitativa de estos procesos celulares. *M. pneumoniae* se seleccionó como modelo de estudio en nuestro laboratorio por su reducido genoma. Desde 2009 nuestro grupo ha caracterizado esta bacteria por lo que respecta a su composición total de ADN (genoma), ARN (transcriptoma), proteínas (proteoma) y metabolitos (metaboloma). Se ha obtenido así información sobre la metilación del ADN, los niveles de ARN y proteínas y un mapa metabólico de las diferentes reacciones bioquímicas que se producen dentro de la célula.

La recopilación de todos estos datos supuso un reto y una enorme contribución para la comunidad científica, pero solo representaba el principio de una nueva etapa. Llegados a este punto, los esfuerzos de nuestro grupo se centraron en la interpretación de su significado biológico, con el fin de convertir toda esta información cuantitativa en un modelo matemático, en una célula «in silico». Judith Wodke y Tobias Mayer, de nuestro grupo, desarrollaron hace un año el primer modelo del metabolismo de *M. pneumoniae* que permitía predecir el efecto de la supresión de uno o varios genes en el crecimiento del microorganismo.

Paralelamente, el equipo de Markus Covert, en la Universidad Stanford, revolucionó el campo de la modelización cuando publicó lo que definió como el primer modelo computacional de un organismo vivo, en concreto, de *M. genitalium*. Dado que no se dis-

poderoso para dar sentido a esos datos desordenados y fragmentados. Por su naturaleza, una simulación permitiría deducir una serie de hipótesis sobre lo que ocurre dentro de una célula, las cuales se podrían transformar en algoritmos matemáticos. Los esquemas que suelen aparecer en los artículos donde se muestra que el factor X regula al gen Y «de algún modo» no son suficientemente precisos para un programa informático. Los programadores expresan esos procesos con ecuaciones (uno de los ejemplos más simples es $Y = aX + b$), aunque tengan que obtener de meras estimaciones los valores de las variables, como a y b. Esta necesidad de precisión revela, en última instancia, los experimentos de laboratorio que deben emprenderse para llenar las lagunas de conocimiento sobre las velocidades de reacción u otras magnitudes.

Al mismo tiempo, quedaba claro que, una vez se hubiera verificado la exactitud de los modelos, estos podrían sustituir algunos experimentos, lo que limitaría el costoso trabajo de laboratorio a preguntas que no pueden responderse solo con simulaciones. Y los experimentos simulados que generasen resultados sorprendentes ayudarían a los expertos a priorizar sus investigaciones y a aumentar el ritmo de los descubrimientos. De hecho, los modelos representan un instrumento tan tentador para distinguir entre causa y efecto que, en 2001, Masaru Tomita, de la Universidad de Japón, afirmó que la simulación de una célula completa constituía «uno de los grandes retos del siglo XXI».

Cuando todavía realizaba el doctorado, me quedé impresionado por los primeros resultados obtenidos por los principales modelizadores de células de aquel tiempo y me obsesioné con este gran reto. Incluso cuando monté mi propio laboratorio y me centré en el desarrollo de técnicas de imagen para células individuales, la idea seguía en mis pensamientos. Y entonces, en aquella vuelta a casa en bicicleta de aquel febrero, vi el camino para abordarla.

DOS ENFOQUES DECISIVOS

Antes de simular el ciclo de vida de una especie microbiana con la exactitud suficiente como para replicar sus comportamientos complejos y realizar así nuevos descubrimientos, tendríamos que resolver tres problemas. Primero, necesitábamos codificar todas las funciones importantes (como el flujo de energía, nutrientes y productos de las reacciones en la célula —su metabolismo—, la síntesis y degradación de ADN, ARN y proteínas, o la actividad de una infinidad de enzimas) en fórmulas matemáticas y algoritmos informáticos. Segundo, debíamos construir un armazón en el que integrar todas esas funciones. El último problema era, desde muchos puntos de vista, el más difícil: establecer límites superiores e inferiores a los aproximadamente 1700 parámetros del modelo de manera que adoptasen valores que se ajustaran a la realidad (o que al menos se situaran en el rango adecuado).

Comprendí que, por muy a fondo que revisáramos toda la bibliografía acerca de *M. genitalium* y sus parámetros (Karr, Sanghvi y yo terminamos pasando dos años seleccionando datos de casi 900 artículos científicos), en algunos casos tendríamos que hacer estimaciones o emplear valores experimentales de

ponía de los datos experimentales requeridos para el modelo de *M. genitalium*, los autores tuvieron que recurrir a parámetros pertenecientes a otras bacterias filogenéticamente próximas, aunque ello no siempre fue posible. Pese al increíble logro que ha supuesto el desarrollo de un modelo con una estructura matemática tan coherente, una de las principales críticas que ha recibido es que no presenta suficiente robustez, dado que los parámetros que permiten hacer las predicciones no corresponden a la bacteria modelizada.

Por este motivo, en tiempo reciente ambos laboratorios hemos unido nuestros esfuerzos con el objetivo de emplear la estructura matemática del modelo de *M. genitalium* y adaptarla para construir un modelo de *M. penumoniae* que integre todos los parámetros de los diferentes módulos, determinados experimentalmente.

Esperamos que este modelo pueda predecir la respuesta a diferentes alteraciones o perturbaciones, ya sean genéticas (eliminación o sobreexpresión de genes, introducción de genes nuevos) o ambientales (suministro de antibióticos, cambios en el medio de cultivo). La capacidad de predecir el comportamiento de un ser vivo en el ordenador supondría un avance en el campo de la biología sintética. En el caso concreto de *M. pneumoniae*, permitiría su utilización como vehículo inteligente para el tratamiento de enfermedades. La posibilidad en un futuro de modelizar seres vivos más complejos abriría nuevos horizontes en las aplicaciones basadas en microorganismos, como la fabricación de biocombustibles, la química limpia o la biorremediación.

Maria Lluch Senar *es investigadora del Grupo de Diseño de Sistemas Biológicos en el Centro de Regulación Genómica de Barcelona.*

Las simulaciones que generasen resultados ayudarían a priorizar las investigaciones futuras y favorecerían los descubrimientos

tipos de bacterias muy diferentes (entre ellas *Escherichia coli*) para obtener ciertos datos, como el tiempo promedio que los transcritos de ARN se mueven por la célula antes de que las enzimas los fragmenten para reciclar sus componentes. Sin un modo de acotar y comprobar esas estimaciones, no teníamos ninguna esperanza de éxito.

En ese momento de inspiración en 2008, me di cuenta de que la modelización de un organismo unicelular (y no de un grupo de células, como en casi todos los estudios previos) podría aportarnos esas cotas que necesitábamos. Consideremos el crecimiento y la reproducción. Una gran población de células crece paulatinamente. El nacimiento y la muerte de una sola de ellas no afecta mucho al conjunto. Pero para un organismo unicelular, la división representa un suceso extraordinario. Antes de que se divida en dos, debe doblar su masa, y no solo la total. La cantidad de ADN, la membrana celular y cada tipo de proteína necesaria para la supervivencia deben duplicarse. Si el modelo se limita a simular una sola célula, el ordenador puede contar y seguir cada molécula durante todo su ciclo de vida. Y cuando la célula se convierte en dos, puede comprobar si todos los números encajan.

Además, un organismo unicelular se reproduce a un ritmo más o menos establecido. De este modo, *M. genitalium* se divide cada nueve o diez horas en el laboratorio. Rara vez tarda menos de seis o más de quince. El hecho de que tenga que duplicar todo su contenido en este intervalo de tiempo nos permitiría elegir posibles intervalos de numerosas variables que de otra manera quedarían sin determinar, como las que controlan el momento en el que comienza la replicación del ADN.

Reuní un equipo de físicos, biólogos, modelizadores, e incluso un antiguo ingeniero informático de Google, para debatir sobre las estrategias matemáticas que debíamos emplear. Michael Shuler, ingeniero biomédico de la Universidad de Cornell y pionero en simulación celular, había construido modelos impresionantes a partir de ecuaciones diferenciales ordinarias. Bernhard Palsson, que dirigió mis estudios en San Diego, había desarrollado una potente técnica, el análisis de balance de flujos, que resultaba adecuada para modelizar el metabolismo. Pero otros investigadores habían demostrado que el azar desempeña un papel importante en la transcripción génica. Además, la división celular conlleva obviamente un cambio en la geometría de la membrana. Esos otros métodos no podrían tener en cuenta tales aspectos. Ya como doctorando me di cuenta de que una sola técnica no puede modelizar todas las funciones de una célula; de hecho, mi tesis describe un método para acoplar dos modelos matemáticos diferentes en un solo simulador.

Decidimos, por tanto, crear un modelo de una célula a partir de 28 módulos, cada uno de los cuales empleaba el algoritmo que mejor se adaptaba al proceso biológico y al grado de conocimiento que poseíamos de él. Pero con esta estrategia obtuvimos una amalgama de procedimientos matemáticos. Necesitábamos unirlos en un conjunto coherente.

Pensé entonces en un curso de diseño de industrias químicas que seguí cuando estudiaba la carrera. Para el proyecto final del curso usamos un potente simulador, denominado HYSYS, para hacer un boceto de una gran refinería. HYSYS permitía diseñar un sistema en el que cada reacción principal ocurría en depósitos separados. Mediante tuberías se conectaban las salidas de un depósito con las entradas de otros. Esta estructura combinaba numerosos tipos de reacciones químicas en un sistema ordenado y predecible.

Se me ocurrió que ese enfoque, con alguna modificación, podría valer para nuestro simulador celular si se asumía una importante simplificación: que aunque todos esos procesos biológicos se produzcan a la vez en una célula viva, sus acciones son independientes, a efectos prácticos, en periodos de menos de un segundo. Partiendo de esta suposición, podríamos dividir la vida de una célula en intervalos de un segundo y ejecutar en ese tiempo cada uno de los 28 módulos, en orden, antes de actualizar el conjunto de las variables celulares. El modelo reflejaría toda la interconectividad de la bioquímica (como la dependencia de la transcripción génica y la síntesis de ADN con la energía y los nucleótidos producidos por el metabolismo), pero solo en escalas temporales superiores a un segundo.

Mientras construíamos nuestra célula virtual, introdujimos sensores en el programa informático para medir lo que sucedía en su interior. Cada ejecución del simulador, que abarcaba el ciclo de vida de una sola célula, producía 500 megaoctetos de datos. Los resultados se recogían en una especie de panel de instrumentos (un conjunto de docenas de gráficas y visualizaciones que, imprimidas, llenaban un archivador).

Al principio solo cosechamos fracasos. Durante meses, mientras corregíamos códigos, ajustábamos algoritmos matemáticos y mejorábamos los límites de los parámetros a partir de datos experimentales, la célula se negaba a dividirse o se comportaba de forma impredecible. Durante un tiempo produjo enormes cantidades del aminoácido alanina y casi nada más.

Entonces, un día, nuestro germen cibernético alcanzó el final de su ciclo celular y se dividió. Y lo que fue aún más excitante, necesitó para ello unas nueve horas, igual que la célula real de *M. genitalium*. Muchos otros resultados seguían apartándose de la realidad, pero sentíamos que el éxito estaba a nuestro alcance.

Mientras examinaba las figuras y las visualizaciones, mi corazón se aceleró. El modelo funcionaba. ¿Qué nos enseñaría?

Meses más tarde, cuando me hallaba en una conferencia en Bethesda, Maryland, recibí un paquete. En la habitación del hotel lo desenvolví y extraje un archivador. Mientras pasaba las siguientes horas hojeando cientos de páginas con figuras y visualizaciones complejas, mi corazón comenzó a acelerarse. La gran mayoría de los datos se parecían a lo que cabría esperar de una célula real en crecimiento. Y el resto eran intrigantes, inesperados pero biológicamente posibles. Supe entonces que había alcanzado la ambiciosa meta que había vislumbrado hacía años. El primer modelo informático de un organismo vivo funcionaba. ¿Qué nos enseñaría?

LA VIDA DE UNA CÉLULA

Después de un año de haber empleado nuestra nueva herramienta, todavía descubrimos aspectos fascinantes en los mecanismos internos del microorganismo virtual al hacer frente a los millones de detalles implicados en la vida y la reproducción. Hallamos, para nuestra sorpresa, que las proteínas se desplazan unas a otras en el ADN a un ritmo muy elevado (unas 30.000 veces durante un ciclo vital de nueve horas). También observamos que el periodo de duplicación del microorganismo, notablemente estable, constituye una propiedad que surge de una interacción compleja entre dos fases distintas de la división, cada una de ellas de una duración muy variable. Y los registros segundo a segundo del comportamiento de la célula nos han permitido explicar por qué esta deja de dividirse cuando se inutilizan ciertos genes pero se reproduce otras diez veces, antes de morir, cuando se desactivan otros genes esenciales. Estas divisiones adicionales se producen cuando la célula acumula más copias de una proteína generada por el gen en cuestión que las que necesita en un ciclo vital. El exceso se transmite a la descendencia, que fallece solo cuando las reservas se agotan. Los resultados iniciales son excitantes, pero tal vez tardemos años en entender toda la información que nos aportan estas simulaciones sobre el funcionamiento de estos microbios y de las células en general.

Nuestro trabajo con *M. genitalium* constituye solo el primero de los muchos pasos que nos llevarán a la modelización de células o tejidos humanos a escala genética y molecular. El presente modelo está muy lejos de la perfección, y los micoplasmas representan una de las formas más simples de vida autosuficiente. Todas nuestras simulaciones, códigos informáticos, base de conocimientos, programas de visualización y datos experimentales se hallan disponibles de manera gratuita en la Red. Nuestro equipo y otros ya estamos trabajando en las mejoras del simulador y en su extensión a otros organismos, como *E. coli* y la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, ambos de amplio uso en laboratorios académicos e industriales.

En estas especies, la regulación génica resulta mucho más compleja y la localización de los procesos dentro de la célula reviste una mayor importancia. Cuando se resuelvan estos problemas, auguro que el siguiente objetivo será una célula de ratón o humana. Tal vez se trate una célula que pueda cultivarse fácilmente, como un macrófago (célula del sistema inmunitario), de la que puedan obtenerse medidas para afinar y validar el modelo.

No puedo adivinar cuánto se tardará en alcanzar ese logro. Comparadas con las bacterias, las células humanas poseen muchos más compartimentos y exhiben un control genético mucho mayor, gran parte del cual desconocemos. Además, al formar parte de tejidos multicelulares, las células humanas interaccionan más íntimamente unas con otras que las bacterias.

El 13 de febrero de 2008, pensaba que estábamos al menos a una década del objetivo de modelizar la célula más sencilla, y ni siquiera habría imaginado modelizar algo más complejo. Hoy podemos concebir la idea de intentar simular una célula humana. Aunque solo sea para ver cómo falla el programa, ello nos iluminará sobre lo que todavía necesitamos aprender de nuestras células. Incluso ese resultado constituiría un gran paso.

PARA SABER MÁS

The dawn of virtual cell biology. Peter L. Freddolino y Saeed Tavazoie en *Cell*, vol. 150, n.º 2, págs. 248-250, julio de 2012.

A whole-cell computational model predicts phenotype from genotype. Jonathan R. Karr et al. en *Cell*, vol. 150, n.º 2, págs. 389-401, julio de 2012.

Bridging the layers: Toward integration of signal transduction, regulation and metabolism into mathematical models. Emanuel Gonçalves et al. en *Molecular Biosystems*, vol. 9, n.º 7, págs. 1576-1583, julio de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Células cibernéticas. W. Wayt Gibbs en *IyC*, octubre de 2001.

Robert L. Dorit es catedrático del departamento de ciencias biológicas en la Universidad Smith. Su trabajo se centra en la evolución experimental de moléculas y bacterias, y en el diseño de nuevos antibióticos.



BIOLOGÍA SINTÉTICA

Crear vida de la nada

La visión modular de la biología sintética olvida que la vida es producto de la evolución

Robert L. Dorit

El 11 de mayo de 1997, Gari Kaspárov apartó su silla de la mesa y se alejó del tablero de ajedrez. Después de tan solo diecinueve movimientos, concedió la partida a Deep Blue, un inmenso computador con procesadores en paralelo construido y programado por IBM. Era la primera vez que una máquina lograba vencer a un gran maestro del ajedrez.

Por todo el mundo, los titulares anunciaban la victoria de la máquina sobre el hombre. Algunos proclamaban que un computador había llegado a ser tan inteligente como un ser humano. Aunque el resultado fue, sin lugar a dudas, un hito en el desarrollo de los ordenadores y en el campo de la inteligencia artificial, a muchos comentaristas se les pasó por alto la conclusión quizá más importante de ese enfrentamiento. Es cierto que Deep Blue consiguió vencer a Kaspárov, pero haciendo únicamente lo que los computadores mejor saben hacer: manejar números. Algunos periodistas se referían, antropomórficamente, a la «estrategia» de Deep Blue, pero se trataba de una táctica falta de toda finura. La máquina analizaba de forma sistemática casi todas las jugadas posibles y sus consecuencias al cabo de varios movimientos. Después, respondía a Kaspárov en función de criterios predeterminados.

La demostración de fuerza bruta computacional de Deep Blue no tenía nada que ver con la forma en que Kaspárov —o incluso yo mismo, si fuese el caso— juega al ajedrez. Lejos de representar una derrota de la inteligencia humana, el resultado demostró que Kaspárov podía, gracias al entrenamiento y a la intuición, jugar una partida de ajedrez analizada con elegancia, mientras que un ordenador solo podría hacerlo de forma tosca y mecánica,

EN SÍNTESIS

La biología sintética ofrece la promesa de crear en el laboratorio una forma de vida diseñada a medida. Sin embargo, a veces se olvida que las estrategias empleadas logran imitar a los organismos vivos, pero no pueden copiarlos.

La explicación de ello se debe a que la vida, tal y como la conocemos hoy, es el producto de la evolución, la materialización de una posibilidad entre muchas otras en la que el azar ha desempeñado un papel importante.

Tener en cuenta este hecho sin duda hará avanzar el campo de la biología sintética. Tal vez se llegue entonces a crear una célula sintética con capacidad de reproducirse y de evolucionar.



mediante cálculos exhaustivos. La empresa IBM necesitó doce años de trabajo coordinado para construir una máquina con la potencia necesaria (aunque no la inteligencia) para vencer a Kaspárov. Incluso así, Kaspárov se mostró claramente inquieto por el resultado. No tenía por qué.

No trato de restar importancia a la victoria de Deep Blue. Se necesitó una tremenda dosis de ingenio humano para desarrollar su *hardware* y su *software*. Pero el camino que le llevó al éxito pone de relieve el hecho de que la inteligencia artificial, por mucha fascinación que despierte, no corresponde a una versión de la inteligencia humana basada en el silicio. Deep Blue venció al ajedrez, precisamente, porque no imitaba las funciones del cerebro humano. La máquina no ganó por su inteligencia, sino por su potencia de cálculo.

AMANECER DE LA BIOLOGÍA SINTÉTICA

Hoy en día, está surgiendo una nueva área de investigación que, de forma análoga, trata de imitar un fenómeno biológico complejo: la propia vida. La biología sintética, un atractivo subcampo experimental de las ciencias de la vida, parece ofrecer la tentadora promesa de crear en el laboratorio una forma de vida diseñada a medida. Pero aquí, de nuevo, quiero señalar que el lenguaje —la selección de las palabras fomentada por oscuras ambiciones— nos confunde. Del mismo modo en que Deep Blue arrojó cierta luz sobre el funcionamiento del cerebro de Kaspárov, sin llegar a reproducirlo, la biología sintética imita a los organismos vivos, pero no puede copiarlos.

Animados, en parte, por los logros de la biología reduccionista (que ha desvelado los mecanismos moleculares fundamentales de la vida, ha elaborado el inventario completo de las reacciones químicas de la célula y ha descodificado los genomas), los investigadores no solo tratan de comprender la vida, sino que intentan construir organismos que hagan lo que les pidamos: fabricar biocombustibles, sintetizar fármacos, obtener compuestos químicos de forma sostenible, limpiar aguas contaminadas, producir alimentos y luchar contra las enfermedades. Los avances técnicos, entre los que se incluyen la automatización de las tareas de laboratorio y el espectacular aumento de la potencia y la memoria de los computadores —aquí podríamos hacer un guiño a Deep Blue—, han ampliado el ámbito de la biología sintética. En 2000, los primeros genomas sintéticos construidos mediante el «corte y empalme» de secuencias de genomas ya existentes y uniéndolas entre sí fueron insertados con éxito en *Escherichia coli*. En 2008, investigadores del Instituto J. Craig Venter lograron sintetizar el genoma bacteriano más pequeño, el de *Mycoplasma genitalium*, cuya longitud supera el medio millón de bases. En 2010, se insertó el genoma sintético de *Mycoplasma mycoides*, con una longitud de una megabase, en una célula receptora de *Mycoplasma capricolum*; consiguieron así la transformación de una especie de *Mycoplasma* en otra en un solo paso.

© ISAK55/THINKSTOCK

En la actualidad, la posibilidad de llegar a comprender la vida a través de la creación de vida ha dejado de ser descabellada. Los objetivos de la biología sintética pueden equipararse a los de Prometeo, que compitió con los dioses, y sospecho que tanto nuestros fracasos como nuestros probables éxitos puntuales acabarán, de hecho, enseñándonos algo sobre el mundo real de los seres vivos, aunque no de la manera que esperábamos.

UNA NUEVA GENÉTICA

Aprovechando los múltiples significados que encierra la palabra *sintética*, han surgido dos variantes opuestas de la biología sintética, cada una de las cuales refleja distintas suposiciones sobre el mundo vivo y sobre los objetivos del campo.

La primera de estas estrategias, denominada ascendente (*bottom-up*) o *de novo*, trata de sintetizar nuevos tipos de células partiendo de cero. Este enfoque aborda una cuestión biológica de hondo calado: ¿hasta qué punto las características químicas de los componentes básicos de la vida limitan la historia de la vida en este u otro planeta?

Durante mucho tiempo, las cuestiones relacionadas con otro posible desarrollo de la historia de la vida solo fueron materia sobre la que reflexionar a altas horas de la noche en congresos científicos. Pero quienes nos enzarzábamos en esas discusiones sabíamos que se trataba de cuestiones profundas, no de simples preguntas abstractas. A lo largo de las dos últimas décadas, se han empezado a investigar a fondo otros tipos de química y de organización posibles para los sistemas vivos de otros planetas. Estos esfuerzos han cobrado importancia a medida que los astrónomos han intensificado la búsqueda de vida en Marte y el número de planetas potencialmente habitables en el sistema solar, o más allá, ha ido aumentando. Si la única vida conocida (la de la Tierra) no representa más que una de las muchas formas posibles de fabricar lo que entendemos por una célula (un sistema capaz de evolucionar), corremos el riesgo de pasar por alto formas de vida que no poseen las características de la vida en nuestro planeta.

En el pasado, mis colegas se limitaban a plantear ese tipo de preguntas sin ser capaces de abordarlas experimentalmente. Después de todo, la vida refleja su único origen común al depender de los ácidos nucleicos (ARN y ADN) para preservar y transmitir la información, y de las proteínas para llevar a cabo la mayoría de sus funciones moleculares esenciales. En cada célula de cualquier organismo de nuestro planeta, todo ha evolucionado en respuesta a estos principios fundamentales. Por consiguiente, en la Tierra no podía haber ninguna alternativa que se pudiese estudiar.

Sin embargo, la falta de elementos de comparación no nos desalentó. En vez de ello, una serie de laboratorios decidieron abordar la cuestión mediante la síntesis química de nuevos componentes básicos (distintos aminoácidos y nucleótidos), para explorar después cómo estos compuestos podrían reabrir rutas evolutivas previamente cerradas.

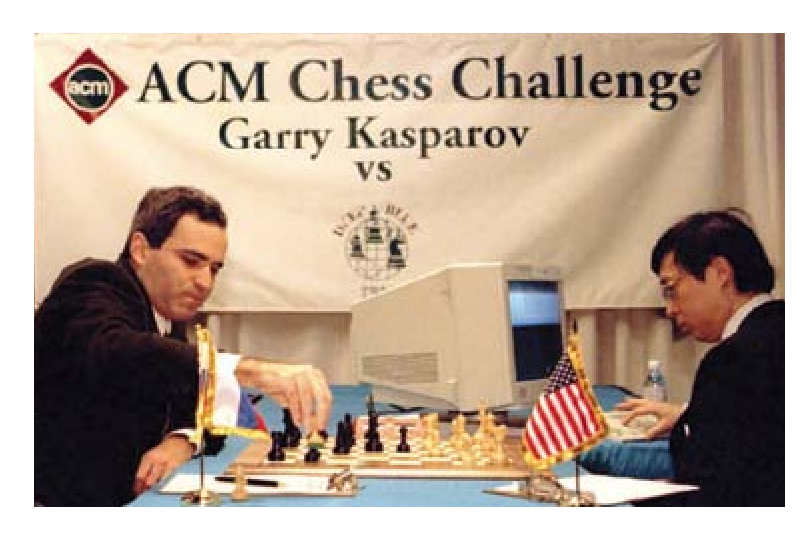
Tal tarea no resultó sencilla: de vez en cuando, en las células vivas surgen, de forma espontánea, aminoácidos y nucleótidos anómalos. Representan una desventaja para una célula sana, ya que pueden provocar el plegamiento incorrecto de las proteínas o detener en seco la replicación. Como resultado, en el transcurso de la evolución, en todos los organismos se han desarrollado diversos sistemas que evitan la incorporación de estos nuevos componentes básicos en los ácidos nucleicos o en las proteínas celulares. No obstante, a lo largo de la última década, la imaginación experimental y la insistencia han permitido seleccionar variantes de maquinarias moleculares ya existentes capaces de funcionar con estos nuevos compuestos. Al hacerlo, mis colegas han conseguido añadir más caracteres a la Piedra Rosetta de los sistemas vivos, es decir, al código genético. Los nucleótidos nuevos o modificados amplían los emparejamientos canónicos A-T y G-C en el ADN, con lo que se incrementa el número de formas y matices que puede adoptar la información hereditaria.

De ese modo, se ha demostrado hace poco que dos nuevos nucleótidos, NaM y 5SICS, se emparejan (aunque de una manera inusual) en el interior de la doble hélice de ADN y pueden ser replicados por la maquinaria celular. Estos nucleótidos presentan geometrías novedosas y, por tanto, su forma de emparejarse difiere ligeramente de la de sus homólogos presentes en la doble hélice de ADN. De igual modo, la ampliación del vocabulario de los aminoácidos más allá de los veinte tipos normalmente presentes en los seres vivos hace posible, a su vez, la síntesis de proteínas con estabilidades, arquitecturas y funciones nuevas [*véase* «Aminoácidos sintéticos», por María Marta García Alai; Investigación y Ciencia, abril de 2011].

Aunque el campo se halla todavía en sus albores, se siguen sintetizando componentes básicos con propiedades únicas. Estos continúan siendo compatibles con las funciones que desempeñan los ácidos nucleicos y proteínas ya existentes. Los resultados ya han dejado una cosa clara: el mundo de la genética que existe aquí en la Tierra no es, en absoluto, el único posible.

RECOMPONER LA VIDA

Una segunda estrategia de la biología sintética, denominada descendente (*top-down*), trata de crear organismos a la carta a partir de un catálogo cada vez más amplio de componentes moleculares ya existentes. Quienes defienden este enfoque argumentan que los biólogos, por fin, han llegado a describir y



EN 1996, el campeón mundial de ajedrez Gari Kaspárov (*izquierda*) comenzó un torneo contra Deep Blue, un computador de IBM. En 1997, Deep Blue marcó un hito al vencer a Kaspárov. Era la primera vez que un ordenador derrotaba a un gran maestro del ajedrez, aunque no lo hizo «pensando» como él. En vez de ello, recurrió a la fuerza bruta computacional.

TOM MIHALEK/AFP/GETTY IMAGES (*Kaspárov*)

comprender los sistemas vivos con un grado de detalle que les permite personalizar esos sistemas para obtener un resultado deseado y abordar así determinadas necesidades humanas. Es lo que denomino «concepción LEGO» del mundo. En ella el genoma se considera, simplemente, como la suma de sus partes. Estas son modulares y se supone que mantienen su integridad y función con independencia del contexto en que se hallen. De ser así, los bioingenieros podrían seleccionar los genes deseados, ensamblarlos en un genoma y generar un organismo que, por sí mismo, jamás habría surgido a lo largo de la evolución.

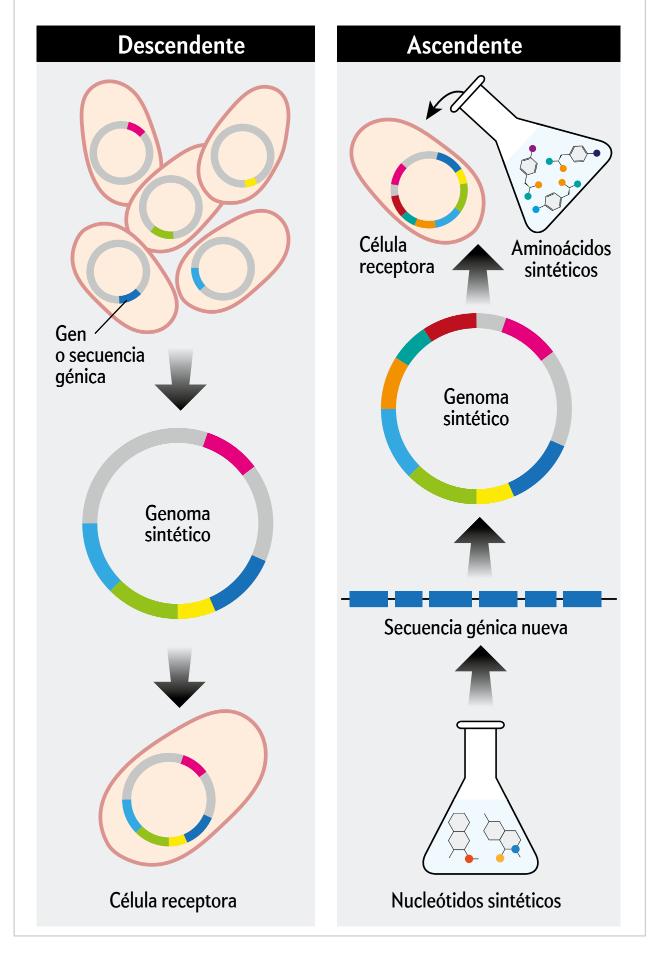
A primera vista, la modularidad, sobre todo a escala molecular, parece ser un rasgo bastante frecuente en el mundo vivo y constituye uno de los pilares de la revolución biotecnológica. Después de todo, esta propiedad permitió a los primeros experimentadores transferir un gen humano al genoma de una bacteria, donde continuaba dirigiendo la síntesis de una proteína humana de interés. A menudo, la naturaleza también intercambia subunidades modulares. Algunos dominios proteicos, genes individuales o agrupaciones de genes que confieren determinados fenotipos (como la resistencia a múltiples antibióticos) se han desplazado de un sitio a otro del genoma, o de un genoma a otro, a la vez que han mantenido su integridad y función. Un ejemplo lo hallamos en los bien conocidos genes *Hox*, responsables de controlar el desarrollo embrionario a lo largo de un eje central. A pesar de haber experimentado repetidas expansiones, contracciones, duplicaciones y cambios de ubicación en el seno de los genomas eucarióticos, han mantenido su función fundamental: determinar patrones esenciales del desarrollo temprano en animales pluricelulares. A lo largo de la historia evolutiva, algunos segmentos genómicos incluso mayores, que abarcan miles de genes, se han desplazado de un lugar a otro sin perder su cometido.

No es mucha la distancia que separa estas observaciones de la convicción de que toda la información genética es básicamente modular y, por tanto, se puede desmontar y volver a ensamblar en un número casi infinito de combinaciones. A medida que el inventario de elementos genéticos conocidos sigue creciendo, la perspectiva de crear organismos que hagan lo que los investigadores desean se vuelve cada vez más seductora. La biología sintética promete que la capacidad del mundo vivo, diseccionado y deconstruido durante la apoteósica primera mitad del siglo de la Edad de la Biología, podrá utilizarse por fin para resolver los problemas más complejos y recalcitrantes de la humanidad, desde la producción de recursos alimentarios casi inagotables hasta la transformación de la luz solar en energía aprovechable sin generar residuos.

DOS ENFOQUES

Formas de generar vida

Los estudios de biología sintética se han basado en dos estrategias generales: descendente (*top-down*) y ascendente (*bottom-up*). En la descendente se toman genes y secuencias de múltiples genomas conocidos, o sintetizados químicamente, y se «cortan y pegan» en uno solo. La estrategia ascendente explora las consecuencias de suministrar a la célula nuevos nucleótidos o aminoácidos, o se utilizan estos componentes básicos sintéticos como punto de partida para crear células *de novo*.



SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST (*ilustraciones*)

LA CÉLULA SIN PASADO

A pesar de nuestros conocimientos cada vez más amplios sobre los circuitos celulares, la creación de nuevos organismos a partir de elementos genéticos ya existentes, según la estrategia descendente, está resultando sorprendentemente difícil. Los genes extraídos de una bacteria no siempre se comportan del modo esperado cuando se introducen en un huésped distinto. Cuanto más heterogéneo sea el conjunto de los elementos insertados, menos se comportarán como estaba previsto. La regulación, sincronización y retroalimentación se colapsan a medida que la sutil conversación que se establece entre las redes metabólicas que forman parte de los sistemas vivos va degenerando hasta convertirse en un balbuceo.

Los expertos en este campo estamos luchando contra la aparente contradicción que supone la supuesta modularidad de la información genética y la tarea extraordinariamente difícil de diseñar un nuevo organismo a partir de datos genéticos conocidos. La explicación, sospecho, se halla en una de las diferencias fundamentales que hay entre la biología y la ingeniería: la importancia de la historia.

Cuando los investigadores combinan información genética procedente de diversas fuentes en un único genoma están, por definición, ignorando la historia. Al hacerlo, esperan ingenuamente que los elementos genéticos se comporten de forma predecible con independencia de su entorno. Pero un gen no es una isla. Toda la información genética ha sido moldeada por la evolución en el contexto de un genoma completo, recluido en el interior de un organismo. Como resultado, solo un puñado de elementos genéticos se comporta de un modo que no depende de su ubicación. Los genes de resistencia a antibióticos constituyen un ejemplo de ello: intercambiados entre las especies del mundo

microbiano, resultan insensibles a su entorno, pero solo porque han evolucionado para ser así.

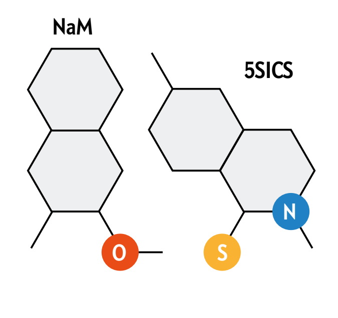
La evolución es un experimento ciego de fuerza bruta que pone a prueba innumerables soluciones. Recuerda mucho a la forma de jugar al ajedrez de Deep Blue, que examina de manera metódica casi todos los movimientos posibles. Este experimento natural, que se está llevando a cabo desde hace más de tres mil millones de años, está introduciendo continuamente elementos genéticos funcionales en contextos novedosos. A veces, esta reubicación es el resultado de un mecanismo que ha surgido de forma ordenada a lo largo de la evolución (como la recombinación que tiene lugar durante la división celular); en otros casos, es consecuencia de sucesos aleatorios inesperados (como la ruptura de un cromosoma o la translocación de genes de una especie a otra).

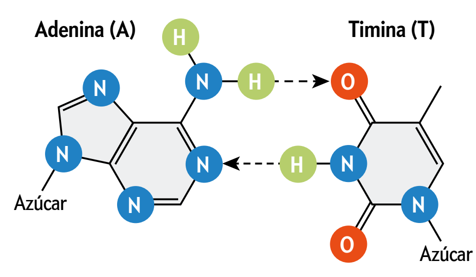
En el experimento natural de la evolución, cada movimiento de la información genética hacia un nuevo entorno se halla sometido al escrutinio riguroso de la selección. Los elementos genéticos colocados en contextos nuevos coevolucionan con sus vecinos dando lugar a entramados de orden superior que contribuyen a la supervivencia y a la reproducción del organismo. Aquellos que no lo hacen son rápidamente eliminados por la selección. Si espera alcanzar los objetivos que se ha propuesto, la biología sintética deberá incorporar a su estrategia esta historia de coevolución, donde los elementos genéticos han evolucionado juntos en la misma comunidad genética.

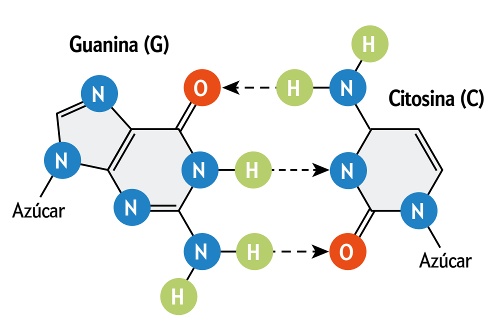
De igual modo, quienes utilizan la estrategia ascendente tendrán que lidiar con la inmensidad de formas en que han evolucionado los organismos para funcionar con los aminoácidos y nucleótidos que intervinieron en los orígenes de la vida, en lo que muy bien podría haber sido un afortunado accidente. La historia de la vida, desde sus comienzos en forma de una química organizada, ha dado lugar a enzimas y orgánulos que dependen extraordinariamente de la química y de la arquitectura de los componentes básicos (nucleótidos y aminoácidos) existentes. La compleja e interconectada maquinaria celular de la vida evolucionó en torno a este pequeño subconjunto de compuestos disponibles (o fáciles de producir) y, al mismo tiempo, aprendió a elegir frente a otras variantes y alternativas. Como resultado, los biólogos sintéticos que tratan de expandir el tamaño y el significado del alfabeto genético se están enfrentando continuamente con la historia. Se pueden concebir y sintetizar otros comienzos químicos, pero la historia de la vida, tal y como realmente se ha desarrollado, no se puede reproducir con tanta facilidad. Ello pone límites a lo que la biología sintética puede esperar obtener con nuevos compuestos básicos.

Nuestros avances en biología sintética ya nos han enseñado mucho. Al confirmar el hecho de que la vida, tal y como existe en la actualidad, no es más que la materialización de una posibilidad de entre muchas otras, y al recordarnos, una vez más, que la eventualidad es un factor importante, el programa de investigación en biología sintética ya ha cosechado frutos. Sospecho que, al final, lograremos crear una célula artificial a partir de nuevos componentes básicos. Esta célula sintética realmente nueva tal vez tenga la capacidad de mantener un complejo entramado de reacciones metabólicas acopladas, e incluso de reproducirse y evolucionar. Pero apostaría a que lo hará de un modo totalmente distinto al de las células vivas ya existentes.

Deep Blue nos enseñó mucho sobre el poder de la mente humana, precisamente porque era incapaz de reproducir los pasos intuitivos y lógicos de la mente de Kaspárov. Una célula verdaderamente sintética, construida a partir de cero o, incluso, a partir de componentes conocidos, carecerá de ancestros y nos enseñará mucho sobre la complejidad que subyace a la vida sin tener que reproducirla. Ello nos volverá a recordar que la biología no es solo ingeniería, que los organismos no son simplemente máquinas ensambladas a partir de componentes que ya existen y que, para los sistemas vivos, la historia es, profunda e ineludiblemente, importante.







LOS ÁCIDOS NUCLEICOS sintéticos podrían expandir el alfabeto genético más allá de los cuatro nucleótidos conocidos que se hallan en el ADN de todos los organismos vivos. Arriba se muestran dos nucleótidos sintetizados químicamente, NaM y 5SICS, que pueden emparejarse y, al hacerlo, mantienen la geometría de la doble hélice del ADN, como ocurre con los pares de bases naturales, A-T (*centro*) y G-C (*abajo*); en última instancia, pueden servir de molde para la maquinaria de replicación de la célula.

PARA SABER MÁS

Synthetic biology. S. A. Benner y A. M. Sismour en *Nature Reviews Genetics*, vol. 6, págs. 533-543, 2005.
Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. D. G. Gibson y col. en *Science*, vol. 329, págs. 52-56, 2010.
Synthetic biology: Applications come of age. A. S. Khalil y J. J. Collins en *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, págs. 367-379, 2010.
Beyond the canonical 20 amino acids: Expanding the genetic lexicon. T. S. Young y P. G. Schultz en *Journal of Biological Chemistry*, vol. 285, págs. 11.039-11.044, 2010.
Bottom-up synthetic biology: Engineering in a tinkerer's world. P. Schwille en *Science*, vol. 333, págs. 1252-1254, 2011.
Synthetic biology: Bits and pieces come to life. J. Collins en *Nature*, vol. 483, págs. S8-S10, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Biología sintética. D. Baker et al. en *IyC*, agosto de 2006.

PSICOLOGÍA

La Mente Inconsciente

Impulsos y deseos inconscientes impelen nuestro pensamiento en formas que Freud no imaginaba

John A. Bargh



ILUSTRACIONES DE TIM BOWER



John A. Bargh es profesor de psicología en la Universidad de Yale. Su Laboratorio sobre Automatismos en la Cognición, la Motivación y la Evaluación investiga la influencia del inconsciente en la conducta y analiza en qué medida existe el libre albedrío.



AL TRATAR DE ENTENDER CÓMO FUNCIONA NUESTRA MENTE, los psicólogos llegan con frecuencia a una conclusión asombrosa a primera vista: las personas tomamos decisiones sin pensárnoslas mucho; o, mejor dicho, antes de haberlas pensado *conscientemente*. Cuando decidimos qué votar, comprar, adónde ir de vacaciones y un sinfín de otras cuestiones, los pensamientos inconscientes suelen desempeñar un papel importante. Investigaciones recientes han arrojado luz sobre la profunda influencia de nuestra mente inconsciente en las interacciones del día a día.

Uno de los estudios más renombrados que ilustran el poder del inconsciente se centró en el proceso de decisión sobre la aptitud de una serie de aspirantes a un cargo público. En una votación simulada, un grupo de personas dispuso de una fracción de segundo para examinar las fotografías, tomadas de Internet, de candidatos al Gobierno y Senado de los EE.UU. no pertenecientes al estado de los probandos. A continuación, se les pedía que valorasen a los candidatos basándose en los breves atisbos de cada foto. Curiosamente, este sondeo predijo con bastante exactitud las preferencias de los votantes auténticos en los estados donde se presentaban los candidatos. Las apreciaciones sobre la aptitud, realizadas a partir de la fugaz visión de los rostros de los candidatos, pronosticaron correctamente el resultado de dos de las tres elecciones en cuestión.

El estudio sobre la influencia del inconsciente en nuestros pensamientos lleva ocupando a los científicos más de cien años. La extensa obra de Sigmund Freud destacaba la consciencia como sede de los pensamientos y emociones racionales, siendo el inconsciente guarida de lo irracional. Pero en la psicología cognitiva contemporánea, la concepción freudiana del mundo ha sido remodelada hacia una dinámica psicológica menos polarizada. Parece ser que ambos tipos de procesos mentales facilitan la adaptación de nuestra especie a las cambiantes exigencias del entorno; una especie que ha sobrevivido sirviéndose de su capacidad mental para cazar un mastodonte en la Edad de Piedra, hacer frente a las justas medievales y, ya en este milenio, especular en el mundo financiero.

La psicología posfreudiana ha arrinconado los conceptos del *ello* y el *yo* para adoptar un enfoque más pragmático sobre lo definitorio del *yo* inconsciente. El premio nóbel Daniel Kahneman ha explicado la moderna distinción entre lo automático y lo controlado. En su libro *Pensar rápido, pensar despacio* describe los procesos del pensamiento automático como rápidos, eficientes y ajenos al conocimiento consciente. Carecen, por tanto, de previa deliberación o planificación. Solo requieren un simple estímulo, como cuando nuestra mente vincula, sin apenas esfuerzo, las palabras de esta página con su significado. Los procesos controlados son de naturaleza opuesta. Exigen la participación intencionada y lenta del pensamiento consciente. Sirva de ejemplo el laborioso esfuerzo que exige la declaración de la renta.

EN SÍNTESIS

Cuando decidimos sobre una votación, una compra, el lugar donde ir de vacaciones y un sinfín de otras cuestiones sobre nuestra vida, a menudo empleamos poco el pensamiento consciente.

Hay buenas razones para que intervengan procesos inconscientes a la hora de deliberar y planificar nuestras acciones. Los juicios automáticos resultan esenciales para evitar peligros inminentes, como ser atropellado por un coche.

Las conductas regidas por el inconsciente no se limitan a mirar a ambos lados antes de cruzar la calle. Gran parte de nuestro comportamiento con otros depende de actitudes adquiridas que subyacen a nuestra consciencia.

Sigmund Freud reflexionó a lo largo de toda su carrera sobre la importancia del inconsciente. Los nuevos estudios ofrecen una visión más pragmática sobre nuestra relación con un superior o el cónyuge.

De modo similar al *ello* primitivo y al *yo* moderador que Freud postuló, los sistemas automáticos y los controlados se complementan mutuamente, y también, a veces, entran en conflicto. Es necesario reaccionar sin pensar para no ser arrollados por un vehículo desmandado, pero también lo es dominarse para no lanzarle un insulto al conductor imprudente.

En el día a día abundan los juicios instantáneos que corresponden a procesos de pensamiento relativamente automáticos. Aparte del reducido número de individuos con quienes solemos relacionarnos, la mayoría de las personas con las que interaccionamos son desconocidos que tal vez no volvamos a ver (como los que encontramos haciendo cola en un banco), o personas a quienes tratamos por su trabajo (cajeras, taxistas, camareros, agentes de seguros, maestros, etcétera). La percepción inconsciente implícita genera expectativas sobre su conducta y personalidad fundadas en una información sucinta. Esperamos que los camareros se comporten de una cierta manera, distinta de la de las bibliotecarias o los camioneros. Tales expectativas nos llegan de forma automática y sin que pensemos en ellas, y se basan solo en la posición social de la persona.

La percepción inconsciente de los demás, a lo largo de un día cualquiera, es como un acto reflejo. Se requiere un esfuerzo consciente y voluntarioso para obviar sentimientos negativos inexplicados, a menudo sin fundamento, que tal vez albergamos hacia otros. Cuanto más vigorosa sea la influencia inconsciente, más habremos de esforzarnos conscientemente para vencerla. Ello se observa sobre todo en los comportamientos habituales. Quizás al llegar a casa por la tarde, un alcohólico se sirva una copa, y una persona gruesa, ataque la bolsa de patatas fritas; ambos desdeñarán prestamente la idea compensatoria de reprimirse.

Para no ser dominados por impulsos difíciles de entender y controlar, resulta esencial comprender el enérgico tirón que el inconsciente nos imparte. La facultad de regular la propia conducta —sea para hacer nuevos amigos, adaptarse a un nuevo empleo o superar un problema de alcoholismo— no solo depende de los genes, el temperamento o las redes sociales de apoyo. Depende también, y no en pequeña medida, de nuestra capacidad para identificar y tratar de vencer los impulsos y emociones automáticos que influyen en todos los aspectos de nuestra vida en vigilia. Para abrirnos camino en el mundo, hemos de aprender a habérnoslas con nuestro *yo* inconsciente.

REACCIONES VISCERALES

Al entrar en contacto con un desconocido, antes siquiera de iniciar una conversación, nos hemos formado ya una primera impresión. Nos fijamos en su raza, sexo y edad, rasgos que, una vez percibidos, vinculamos de forma automática con estereotipos interiorizados sobre cómo se comportan los miembros de cierto colectivo. Estos prejuicios sobre el grupo social en cuestión —que calificamos de hostil, perezoso, agradable, habilidoso— a menudo son incorrectos por lo que respecta al miembro de ese grupo que tenemos delante, quien seguramente no habrá hecho nada para merecer alguna de estas impresiones, sean buenas o malas.

Tales reacciones reflejas suelen ser contumaces, incluso aunque vayan en contra de nuestras creencias conscientes. Muchas personas que dicen mantener actitudes abiertas hacia los grupos minoritarios quedan sorprendidas cuando los sociólogos les revelan sus contradicciones con ayuda de un sencillo test. En el test de asociación implícita se les pide a los probandos que caractericen objetos presentados en una pantalla según las propiedades que posean. Así, un cachorrillo podría calificarse de bueno; una araña, de mala. Después, se le muestran al probando

rojo azul naranja morado
naranja azul verde rojo
azul morado verde rojo
naranja azul rojo verde
morado naranja rojo azul
verde rojo azul morado
naranja azul rojo verde
verde morado naranja rojo

DESCONEXIÓN. **La lentitud en mencionar el color de una palabra que designa un color distinto puede indicar una distracción inconsciente.**

FUENTE: «STUDIES OF INTERFERENCE IN SERIAL VERBAL REACTIONS», POR J. R. STROOP. EN *JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY*, VOL. 18, N.º 6, DICIEMBRE DE 1935

una serie de rostros de personas de diferentes razas y se le pide que los clasifique como blancos, negros y demás.

He aquí el truco: en las dos tareas (la evaluación inicial y la clasificación en grupos) se utilizan los mismos pulsadores. El izquierdo podría servir para declarar «bueno» y «blanco» y el derecho, para «malo» y «negro». En un ensayo posterior, los botones se rotulan a la inversa, de modo que ahora el pulsador izquierdo registra objetos buenos y rostros negros, y el derecho corresponde a malos y blancos. Un probando de raza blanca demostraría prejuicios subyacentes si la tarea le resulta más fácil (responde con mayor rapidez) cuando los pulsadores están configurados para malo/negro que cuando lo están para bueno/negro. Muchas personas con una actitud consciente positiva hacia los grupos minoritarios, y que se consideran motivados a tratar a todos con justeza y ecuanimidad, quedan sorprendidas por la mayor lentitud en presionar los botones bueno/negro.

Las reacciones de este tipo complican las relaciones interpersonales y el trato equitativo en los tribunales, el lugar de trabajo y las escuelas, precisamente porque emanan de la mente inconsciente. Dado que no tenemos constancia de ellos, estos sentimientos tienden a entrometerse en todo lo que nos ocupe en ese momento. En lugar de admitir un prejuicio racial que nos negamos a reconocer, desviamos nuestra atención hacia algún rasgo o peculiaridad negativa de la persona en cuestión. El responsable de admisión de alumnos en una universidad podría fijarse en las calificaciones menos brillantes de un candidato, a pesar de que en todos los demás aspectos ofrezca sólidas garantías, debido a que este pertenece a un grupo minoritario;

Por qué algunos estudios sociales no son reproducibles

Algunos informes recientes denuncian que los estudios iniciales que demostraban la influencia del inconsciente sobre la conducta social (que señalaban que se camina más despacio tras oír palabras asociadas a la vejez, como «residencia» o «andador») no se observaba en los experimentos repetidos que empleaban los mismos procedimientos. Sin embargo, tales informes han obviado a menudo que numerosos estudios publicados en los diez últimos años sí han reproducido con éxito los hallazgos originales sobre el pensamiento y la conducta inconsciente, además de ampliar esta línea de investigación hacia nuevas direcciones.

Tales estudios han confirmado que un gesto inconsciente o una palabra dejada caer para los que antes se ha formado una vigorosa asociación pueden modificar la conducta de una persona. Han aportado pruebas de que las motivaciones subliminales se valen de los mismos procesos mentales (memoria operativa y función ejecutiva) que intervienen en los actos conscientes de autocontrol; y de que las personas suelen desconocer las auténticas razones que subyacen a la conducta cuando es influida por impulsos inconscientes.

Los estudios que no han logrado reproducir estos efectos en general no han incorporado los procedimientos, empleados en ensayos anteriores, que elevan la probabilidad de detectar la influencia del inconsciente en el comportamiento. En muchos de los experimentos iniciales se utilizaron palabras y material verbal para desencadenar una conducta. Los estudios que han evitado recurrir a estrategias verbales y las han sustituido por estímulos más realistas y naturales, como fotografías de diversos deportistas, han obtenido mejores resultados. Esta clase de estímulos son los que más importan para desencadenar efectos inconscientes en nuestro día a día.

Los estudios de neuroimagen que han examinado la activación de regiones cerebrales a causa de estímulos inconscientes han respaldado esta rama de la psicología social. Tales trabajos aportan cierta comprensión de los fundamentos fisiológicos del impulso inconsciente. En las imágenes cerebrales se observa que las áreas que se activan durante la percepción de una superficie «áspera» o «suave» también lo hacen cuando una persona tiene, o no tiene, dificultades para relacionarse con otra (con la que presenta, en esencia, una interacción «áspera» o «suave»). Además, las regiones que responden al calor físico también se activan ante la cordialidad y generosidad de una relación social cálida.

La cuestión no estriba en si los diversos efectos inconscientes sobre juicios y conductas son reales y reproducibles (como, de hecho, se ha demostrado), sino por qué algunos investigadores obtienen estos efectos y otros no. Se trata de una cuestión importante para seguir avanzando en el conocimiento de la forma en que operan las influencias sociales inconscientes. Subraya la necesidad de prestar atención a los contextos y condiciones que se requieren para producir pensamientos y conductas a partir de estímulos inconscientes. Sin duda, los esfuerzos deben proseguir. Pero el conjunto de datos recopilados hasta ahora muestra que la influencia del inconsciente sobre juicios, emociones, conductas y motivaciones resulta importante para la sociedad en su conjunto y para la vida cotidiana de los individuos.

quizá no se percate, en cambio, de que con otros aspirantes no ha sido tan estricto.

Aunque la investigación sobre percepción social inconsciente con frecuencia se ha centrado en los estereotipos y prejuicios, las indagaciones en esta línea son de alcance mucho mayor. En general, cuesta mucho averiguar el origen de los diversos sentimientos, lo mismo positivos que negativos, y se propende a malentender sus auténticas causas. He aquí una demostración clásica de este efecto. En una encuesta telefónica, se pedía a los entrevistados que valorasen cómo les había ido en la vida hasta entonces. Las respuestas dependían del día que hiciera: si el tiempo era agradable, tendían a caracterizar toda su existencia como feliz. Pero en cuanto se percataron de este efecto, el cambio fue inmediato: cuando los entrevistadores les llamaron la atención sobre el tiempo que hacía, su sentir ya no quedó matizado por las condiciones meteorológicas.

SIN CONTROL

Los pensamientos y sentimientos inconscientes no solo influyen en la percepción de uno mismo y del mundo circundante, sino también en nuestros actos cotidianos. El efecto del inconsciente sobre la conducta ha suscitado debates entre los psicólogos a lo largo de decenios. Durante buena parte del siglo xx, B. F. Skinner y la escuela de psicología conductista sostuvieron que nuestros actos se hallaban determinados por lo que veíamos, oíamos y tocábamos en nuestro entorno, y que la intención consciente no desempeñaba papel alguno. Esta idea estaba integrada en el clásico experimento de la rata, que aprendía, a base de ir probando, que cada vez que empujaba una barrita recibía una ración de alimento. En la visión skinneriana del mundo, casi todo cuanto hacemos se traduce en variantes más elaboradas y complejas de este experimento; solo necesitamos pulsar el equivalente de la barra correcta —quizás echar una moneda en una máquina de caramelos— para obtener lo que deseamos.

La doctrina conductista de Skinner quedó desacreditada en los años sesenta. Pero el principio opuesto, a saber, que la conducta se halla siempre sometida a un control deliberado, y nunca provocada por las condiciones del entorno, es igualmente falso. Basta observar o escuchar a otra persona para que nos comportemos de cierto modo, sin tan siquiera darnos cuenta.

Las personas tenemos una tendencia natural a imitar las conductas ajenas: la expresión de sus emociones, los gestos de brazos y manos, sus posturas corporales. Tales impulsos apa-

recen también en el mundo natural: los cardúmenes de peces, las manadas de antílopes o las bandadas de pájaros coordinan con fluidez su conducta grupal, como si constituyeran un solo organismo. En los humanos, la tendencia a remedar lo que hacen otras personas cercanas se ha observado en bebés y niños de corta edad, y los psicólogos llevan casi un siglo sosteniendo que tal pauta contribuye al aprendizaje de la lengua y de otras conductas de nuestros progenitores.

La imitación, por otra parte, no desaparece con la infancia. El efecto camaleón nos lleva a adoptar la postura y otras conductas físicas de personas con quienes acabamos de trabar conversación en una fiesta: la misma forma de encabalgar las piernas, cruzarse de brazos o rascarse una ceja. La mímica prosigue hasta que decidimos tomar una copa y buscar un nuevo interlocutor, cuya postura o actitud imitamos a su vez, como un camaleón hace con su entorno. La adopción de conductas ajenas podría tener una justificación adaptativa, sobre todo cuando no se sabe exactamente cómo proceder en una determinada situación social.

El aforismo «Donde fueres, haz lo que vieres» es razonable, porque no cabe esperar que los locales participen en conductas imprudentes o socialmente reprobables. Y como han demostrado investigaciones de Paula Niedenthal y Robert Zajonc, cuando ambos colaboraban en la Universidad de Michigan, un fascinante efecto a largo plazo de esta proclividad a la imitación es que los miembros de una pareja tienden a parecerse tanto más cuanto más tiempo llevan juntos, presumiblemente porque, a diario, tienden a adoptar las expresiones faciales y las posturas de su cónyuge sin advertirlo.

La imitación fomenta una mentalidad social sin necesidad de indicaciones explícitas que informen de lo que se ha de hacer a continuación. Las personas que hacen cola con paciencia inducen a los recién llegados a imitarles; abrirle la puerta a un vecino, refrenar al perro o no ensuciar la calle crea en otros un estado mental que les anima a hacer lo correcto. La imitación inconsciente alienta sentimientos de empatía hacia el prójimo, favorece el vínculo social y despierta un sentimiento de cercanía incluso entre desconocidos. El remedo adquiere máxima intensidad cuando dos o más personas participan a la vez en una misma actividad. Tal es el caso de un desfile militar o de un grupo de fieles entonando un mismo himno en su iglesia. Las investigaciones sobre sincronización conductual han demostrado que esta tiene el efecto de incrementar la cooperación, incluso si los individuos implicados nunca se habían visto antes.

Por desgracia, la tendencia natural a la imitación tiene doble filo. Como han observado en trabajos de campo el psicólogo Kes Keizer, de la Universidad de Groninga, y sus colaboradores, una fechoría lleva a otras. Los investigadores observaron que la presencia de grafitis en la pared de un callejón se asociaba a un mayor número de octavillas publicitarias lanzadas al suelo (estas se habían colocado previamente en el manillar de bicicletas estacionadas en la calleja). Se ha visto así que combatir las pintadas y otras infracciones menores puede tener importantes consecuencias en la calidad de la vida ciudadana. Esta investigación viene a respaldar la «teoría de las ventanas rotas» defendida por el exalcalde de la ciudad de Nueva York Rudy Giuliani, quien a mediados de los noventa promovió la aplicación estricta de ordenanzas contra infracciones de poca importancia, como arrojar desperdicios en la vía pública, cruzar las calles sin respetar las señales o el vandalismo urbano. El importante descenso de los delitos durante ese período ha sido atribuido, en parte, a esta política.

A menudo, la tendencia a copiar a los otros se extiende más allá de la imitación de meros ademanes o expresiones faciales. Cuando nos encontramos con un conocido, o cuando lo evocamos, se pondría en marcha un proceso mental que nos empujaría a iniciar comportamientos propios de esa otra persona. Ciertas investigaciones han revelado que cuando se presentaba a estudiantes conceptos asociados con personas de edad avanzada («residencia», «canas», «andador» y demás), estos recorrían a continuación el vestíbulo más lentamente, de acuerdo con el estereotipo de que los mayores son lentos y débiles. De forma similar, los estímulos verbales o gráficos en relación con la imagen estereotípica de la enfermera suscita conductas de ayuda, mientras que los correspondientes a políticos inducen discursos más ampulosos. Todos estos efectos parecen darse de modo inconsciente y sin que los participantes se percaten de que su conducta recibe una influencia externa.

Algunas investigaciones sobre lo que en psicología social se denomina amenaza del estereotipo han revelado que la mera evocación de un estereotipo relativo a la raza, el sexo o la etnia en un miembro de un grupo al que se atribuyen tales prejuicios puede afectar el rendimiento escolar o laboral de esa persona. Claude Steele, de la Universidad Stanford, ha demostrado que los estudiantes obtienen peores resultados en un examen si antes de empezarlo se les pide que marquen en una casilla su pertenencia a una determinada minoría, racial o étnica. La psicóloga Nalini Ambady, por entonces en la Universidad Harvard, demostró que incluso las niñas de la guardería de Harvard fallaban más en sencillos ejercicios de matemáticas si antes se les recordaba sutilmente que eran del sexo femenino. Los estereotipos positivos ejercen el efecto contrario. En el mismo estudio, las niñas asiático-estadounidenses rendían más que el promedio si se les recordaban sus raíces étnicas, pero quedaban por debajo si se llamaba la atención sobre el sexo al que pertenecían.

En tiempo reciente se ha suscitado una controversia debido a la incapacidad de repetir los resultados de ese tipo de estudios. Las razones de que no fueran reproducibles resultan complejas y dependen, en parte, de los métodos utilizados para realizarlos.

De hecho, la influencia inconsciente no siempre nos motiva del mismo modo. La idea de la publicidad subliminal en los cines es ampliamente conocida (en el pasado se creía que al proyectar imperceptiblemente «coma palomitas» en la pantalla se dispararía la venta en los puestos correspondientes). La preocupación por la publicidad subliminal brotó en los años cincuenta, con la publicación de *Las formas ocultas de la propaganda*, de Vance Packard. Resultó que casi todos los informes allí presentados eran falaces, pero la posibilidad de que mensajes subliminales influyan en la conducta de los consumidores sigue despertando inquietud. En efecto, las investigaciones posteriores han demostrado sistemáticamente que si una persona está motivada para hacer algo (como saciar la sed), un mensaje subliminal que favorezca cierta marca de bebida puede resultar eficaz.

La publicidad ordinaria, sin incordios de mensajes ocultos, constituye por sí misma una poderosa influencia. En un nuevo estudio en que se examinaba la publicidad televisiva, los participantes presenciaron un segmento de cinco minutos de un programa de humor y se les entregó un cuenco con galletitas saladas. Cualquier tipo de anuncio de comidas durante las interrupciones de publicidad incrementó de forma notable el consumo de galletas en los probandos. Los anuncios de alimen-



tos estimulaban el picoteo, sin que interviniera ningún artificio subliminal. El error que se suele cometer consiste en presumir que podemos controlar los efectos de un anuncio sobre nuestra conducta por el simple hecho de tener consciencia plena de su contenido.

COGNICIÓN IMPLÍCITA

Parte de las investigaciones sobre el inconsciente y la conducta se centran en la influencia del entorno físico en nuestro estado psicológico. En los años ochenta, Fritz Strack, ahora en la Universidad de Wurzburgo, y sus colaboradores demostraron que la reacción inconsciente de una persona ante la propia expresión del rostro (sonriente o ceñuda) bastaba para registrar un juicio de valor (de agrado o desagrado) acerca de un objeto en su campo de visión. Los probandos sostenían lápices, bien entre los dientes —lo que contraía los músculos de sonrisa—, bien entre los labios, lo que obligaba a fruncir el ceño. La forma que adoptaban los músculos faciales suscitaba el correspondiente estado psicológico.

Los estudios en esta área de investigación, conocida como cognición implícita, han revelado la existencia de una pléyade de acciones y sensaciones físicas que provocan estados psicológicos metafóricamente relacionados con tales conductas y sentimientos. La evocación de un incidente del pasado, en el que fueron heridos los sentimientos de alguien, puede hacer sentir mayores deseos de ayudar a otros y cooperar amistosamente, para compensar la mala acción. En un conocido estudio, tras hacer recordar a los participantes alguna acción que les hiciera sentir culpa, estos debían lavarse las manos, según se les explicó, para impedir la difusión de un virus gripal en la sala del experimento. El acto físico de lavarse las manos parecía «limpiarles» la culpa. En el grupo que efectuó estos ejercicios de fregado se esfumaron las tendencias amistosas o colaboradoras, en contraste con quienes no tuvieron que lavarse. Este fenómeno ha sido llamado efecto Macbeth, por los compulsivos rituales de lavado de Lady Macbeth en la tragedia homónima de Shakespeare.

De modo análogo, la protección contra la enfermedad parece satisfacer necesidades abstractas, sociales o políticas. En un

estudio, los probandos políticamente conservadores recién vacunados contra el virus gripal H1N1 expresaron actitudes menos intolerantes hacia los inmigrantes que quienes no habían sido inoculados, como si la protección contra la invasión gripal les hiciera percibir que los recién llegados eran bienintencionados, no invasores ni expoliadores de la cultura que les recibía.

También se aplican las metáforas a quienes encontramos a diario. Todos comprendemos el significado de una relación «íntima» o de un padre «frío». Una teoría reciente, llamada andamiaje conceptual, afirma que utilizamos estas metáforas porque la versión abstracta del concepto mental está fuertemente asociada al mundo material en que habitamos. En experimentos, los probandos que sostuvieron un breve tiempo entre las manos una taza de café caliente se formaron de otras personas la impresión de que eran «más cálidas», más amigables y generosas que si hubieran sostenido café helado. Estudios afines sobre la influencia, inconsciente y metafórica, de sensaciones físicas sobre la opinión y la conducta, han revelado que si se hace sentar en sillas duras a los participantes de una negociación, estos tienden a adoptar líneas más «duras» y se muestran menos flexibles que si lo hacen en asientos blandos. Y cuando tienen asido algún objeto áspero, consideran que un encuentro ha sido más desagradable y ha ido peor.

De forma inconsciente tendemos a valorar casi todo con lo que entramos en contacto en una burda dicotomía de «bueno» o «malo». Esta respuesta automática se refleja incluso en nuestros movimientos básicos, en nuestra inclinación a aproximarnos o rehuir un objeto. Reinout Wiers, psicólogo clínico de la Universidad de Ámsterdam, ha desarrollado recientemente una intervención terapéutica frente al alcoholismo y la drogadicción basada en esta idea. Durante el tratamiento, los pacientes debían responder a imágenes representativas de distintas formas de alcoholismo empujando una palanca para alejarlas de sí, sin instrucción alguna sobre cómo valorar el significado de las imágenes. Comparados con un grupo de control, quienes respondieron apartando de sí la palanca presentaron un menor porcentaje de recaída al cabo de un año, así como actitudes reflexivas más negativas hacia el alcohol. La conexión inconsciente con la ejecución de movimientos musculares asociados al repudio causó actitudes psicológicas negativas y una reacción visceral que contribuyó a que los pacientes superasen la tentación de beber fuera ya de la clínica.

DE VUELTA A FREUD

Los trabajos experimentales más recientes se ocupan de los propósitos y motivaciones inconscientes, de la cuestión fundamental «¿Qué quiere la gente?», un tema central en la dilatada carrera de Freud. Las teorías modernas sobre el motor de la conducta difieren de la propuesta por el neurólogo austríaco porque son fruto del estudio de grupos de personas corrientes, y no de casos clínicos de individuos anómalos. Apuntan, asimismo, hacia un único sistema psicológico, que todos poseemos, capaz de operar de modo consciente o inconsciente; por el contrario, el inconsciente freudiano sigue sus propias reglas, separadas por completo de las que gobiernan la actividad consciente.

En efecto, en la moderna psicología del deseo se ha descubierto que, seamos o no conscientes de que nos hemos propuesto un determinado objetivo, nuestra forma de perseguirlo se asemeja mucho en ambos casos. En investigaciones sobre este fenómeno realizadas por Mathias Pessiglione y Chris Frith, del Centro de Neuroimágenes Wellcome Trust del Colegio Universitario de Londres, se pidió a los probandos que accionasen una palanca lo más rápido posible cuando se les indicase. Antes de cada intento, se les proporcionó una pista, ora consciente, ora subliminal, sobre la recompensa que recibirían. Los incentivos más elevados (que variaban entre libras y peniques) produjeron acciones más rápidas, tanto si fueron percibidos conscientemente como si no. Además, las imágenes del cerebro revelaron que en ambos casos se activaban las mismas regiones. Este y otros estudios llevan a pensar que un estímulo percibido de modo inconsciente puede bastar para que una persona persiga un objetivo sin consciencia alguna de cómo se originó, sin que intervenga la reflexión o la voluntad.

Nuestra mente inconsciente no solo puede orientarnos hacia una opción determinada, sino que puede hacernos reunir la motivación necesaria para lograrla. Se sabe desde hace tiempo que, en experimentos de ciencias sociales, las personas a quienes se otorga poder suelen exhibir conductas egoístas y corruptas, anteponiendo a todo sus intereses personales. La ambición de ejercer el poder en el seno de un grupo suele manifestarse en una serie de indicios físicos sutiles, de los que el sujeto en cuestión no se percata. En un estudio, los probandos aleatoriamente nombrados para ocupar el sillón de la mesa del profesor se mostraron menos interesados por lo que otros pudieran pensar de ellos, y menos inhibidos en manifestar sentimientos racistas o antisociales, que los participantes sentados enfrente en un asiento de estudiante.

Afortunadamente, son muchos quienes desean el bienestar de otras personas, como es el caso de los padres, que sitúan los intereses de sus hijos por encima de los suyos propios. Si el poder conlleva una activación inconsciente de importantes ambiciones personales, cabe suponer que estos individuos «de orientación comunitaria» se mostrarán más proclives a ayudar a los demás y menos a centrarse en sí mismos. En efecto, los estudios revelan que el poder hace que estos individuos asuman perspectivas más altruistas y dejen menos carga en hombros de otros; todo ello, nuevamente, sin que tengan consciencia de sus motivaciones. Asimismo, estas personas están más pendientes de la consideración ajena y acusan menor tendencia a albergar prejuicios raciales.

Freud dedicó incontables palabras a explicar por qué nuestros deseos insatisfechos se expresan en las imágenes y fantasías de nuestros sueños nocturnos. Las últimas investigaciones proporcionan una perspectiva más pragmática de cómo el pensamiento y la emoción que subyacen a la consciencia dan forma a nuestras relaciones con un jefe, un cónyuge, un progenitor o un niño. Lo cual entraña que podemos arrinconar nociones anticuadas, como el complejo de Edipo, y aceptar la realidad de que el inconsciente se manifiesta en todos los instantes de nuestra vida, tanto en la vigilia como en lo profundo de un sueño.

PARA SABER MÁS

Automaticity in social-cognitive processes. John A. Bargh et al. en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 16, n.º 12, págs. 593-605, diciembre de 2012.

The selfish goal: Autonomously operating motivational structures as the proximate cause of human judgment and behavior. Julie Y. Huang y John A. Bargh en *Behavioral and Brain Sciences* (en prensa).

EN NUESTRO ARCHIVO

Vuelve Freud. Mark Solms en *IyC*, julio de 2004.

Neuropsicoanálisis. Steve Ayan en *MyC* n.º 18, 2006.

ENFERMEDADES EMERGENTES

INFECCIONES QUE

Los patógenos de los animales terrestres están llegando al océano, donde amenazan a nutrias, focas, ballenas, corales y otras especies marinas

Christopher Solomon

Como en una novela policíaca, nuestra historia empezó con una llamada telefónica. Un biólogo nos comunicó que había hallado un cadáver. Volvió a llamar a los pocos días, tras descubrir uno más. Pronto las llamadas se repitieron una y otra vez, recuerda Melissa A. Miller. «En el momento álgido, recibíamos cuatro al día.» A medida que crecía el número de víctimas, cada vez nos asaltaban más preguntas.

Miller es veterinaria y patóloga de fauna silvestre. Los cadáveres pertenecían a nutrias marinas de California, una subespecie amenazada cuya población actual a lo largo de la costa central del estado suma unos 2800 ejemplares. En total, más de cuarenta nutrias llegaron enfermas o moribundas a la costa durante el terrible episodio de abril de 2004.

Miller pasó muchos días examinando los animales muertos, buscando la causa de la catástrofe. Estaba desconcertada. Mientras agonizaban, numerosas nutrias se sacudían con convulsiones. La autopsia reveló extensos daños neurológicos. Finalmente, se descubrió un patrón generalizado de inflamación cerebral intensa. Encorvada sobre el microscopio, Miller y sus colaboradores identificaron un culpable inesperado: la zarigüeya.

En realidad, el responsable de la mortalidad era *Sarcocystis neurona*, un parásito unicelular relacionado con la malaria cuyo principal hospedador es la zarigüeya de Virginia. Sin embargo, *S. neurona* corresponde a una enfermedad de los animales terrestres y, además, las zarigüeyas son nativas de los Apalaches, no del oeste de Norteamérica. ¿Cómo podía aquel parásito causar la muerte de nutrias marinas en el Pacífico?

Tras realizar un trabajo detectivesco se reveló una historia insólita. Los emigrantes que a principios del siglo xx se desplazaron del este al oeste de Norteamérica ayudaron a las zarigüeyas a instalarse en la zona de San José, en California. La especie invasora prosperó y se extendió hasta la Columbia Británica. Las zarigüeyas infectadas liberaron en sus heces esporocistos de *S. neurona*, unas estructuras reproductoras resistentes. Miller y sus colaboradores suponen que una fuerte tormenta de finales de invierno transportó una enorme cantidad de esporocistos corriente abajo, hasta alcanzar las aguas de la bahía de Morro, en California. Allí fueron atrapados por navajas que, enterradas en la arena, filtran el agua; y estas, a su vez, fueron consumidas por las nutrias.

Aunque con anterioridad otros patógenos ya habían pasado del medio terrestre al marino, como el virus del moquillo, que mató a miles de focas, aquella era la primera mortalidad masiva

INVADEN EL MAR



LOS GATOS DOMÉSTICOS son portadores de un parásito, *Toxoplasma gondii*, presente también en delfines enfermos varados en el mar Mediterráneo.

SHERI L. GIBLIN, GETTY IMAGES (*gato*); HIROYA MINAKUCHI, GETTY IMAGES (*delfín*)

EN SÍNTESIS

Los patógenos humanos, de los gatos y de otros animales terrestres están alcanzando el océano y atacando a los mamíferos que viven en él. Un parásito de la zarigüeya mata nutrias marinas; uno procedente de los gatos termina con la vida de delfines.

Aunque los datos son aún recientes, estos «polutágenos» parecen estar aumentando. Además, se han hallado bacterias humanas resistentes a los antibióticos en tiburones y focas; ello permitiría a los microbios mutar y reinfectar a los humanos, quienes tal vez no estén preparados para enfrentarse a ellos.

Una depuración adecuada y el incremento de la superficie de humedales costeros, zonas que sirven de amortiguación entre la tierra y el mar, podrían hacer disminuir el riesgo de los polutágenos.

de mamíferos marinos causada por un parásito que atacaba desde la tierra.

Todos conocemos enfermedades como la rabia, que puede transmitirse de los animales al hombre. Pero ¿qué pasa con el camino inverso? Durante la última década, los oceanógrafos han observado una tendencia preocupante: la fauna marina enferma a causa de nuestros patógenos, así como los de las mascotas, el ganado y la fauna silvestre que vive junto a nosotros. Se ha acuñado incluso un nuevo término, polutágeno (patógeno contaminante), para referirse a las bacterias, hongos y parásitos de origen terrestre que están invadiendo el mar. La transmisión se está produciendo en todo el mundo y hace enfermar a especies como las focas comunes, los leones marinos y las marsopas, por no hablar de las desafortunadas nutrias marinas de California.

Existen ejemplos chocantes, a veces estrambóticos. En 2001 se informó que una cepa de *Salmonella* Newport, normalmente asociada a las aves y al ganado, era la causa más probable de muerte de una orca recién nacida. Esta había quedado varada frente al condado de Ventura, en California, a pesar de que las orcas nadan lejos de la costa y, supuestamente, de la contaminación. Y en Carolina del Sur, se han hallado delfines mulares portadores de la bacteria *Staphilococcus aureus* resistente a la meticilina.

Los datos demuestran que nuestras enfermedades no solo afectan a los mamíferos. En 2011, las pruebas genéticas permitieron deducir la presencia en las aguas residuales de *Serratia marcescens*, causante de meningitis y responsable de la epidemia de viruela blanca que eliminó el 90 por ciento del coral cuerno de alce del Caribe. Por primera vez, un patógeno humano infectaba a un invertebrado marino.

La idea de la transferencia de patógenos de la tierra al mar resulta tan novedosa que aún se está intentando determinar su magnitud y hasta qué punto se trata de un fenómeno nuevo. Algunos expertos argumentan que nuestros vapuleados ecosistemas marinos se enfrentan a problemas más acuciantes, como la acidificación. Otros, en cambio, afirman que la desaparición de las barreras entre la tierra y el mar permitiría a los patógenos infectar y terminar con la vida de una enorme variedad de especies marinas. Tal tendencia ofrecería a los gérmenes la posibilidad de mutar e infectar de nuevo a los humanos. Al fin y al cabo, trabajamos y nos divertimos en el mar y consumimos muchos de sus habitantes. Necesitamos conocer con mayor profundidad lo que está sucediendo y tomar medidas, algunas sencillas, para ayudar a las especies marinas y, de hecho, a nosotros mismos.

HECES INFECTADAS

Por muy amenazadores que nos parezcan los polutágenos, debemos determinar primero hasta qué punto se trata de un problema reciente y extendido. El patógeno terrestre mejor estudiado de entre los que afectan actualmente a la fauna marina procede del gato, la mascota más popular en Estados Unidos. *Toxoplasma gondii*, pariente de *S. neurona*, es un protozoo parásito, un organismo unicelular. Completa su ciclo biológico en el interior del felino, pero se ha adaptado para invadir y proliferar en los tejidos de otras especies. La cuarta parte de la población humana de EE.UU. mayor de 12 años es portadora del parásito. Aunque apenas tiene efectos patológicos, se aconseja a las mujeres embarazadas no limpiar la caja del gato porque el parásito puede causar defectos en el feto. Hoy, *T. gondii* ha invadido la vida marina en todo el mundo. Ha atacado a las nutrias de California de Miller, a los delfines que han varado en el mar Mediterráneo y a las escasas focas monje de Hawai, críticamente amenazadas. «Se trata de una enfermedad cosmopolita», afirma Stephen Raverty, patólogo veterinario del Centro de Salud Animal de la Columbia Británica y experto en polutágenos.

Christopher Solomon, antiguo periodista de *Seattle Times*, escribe habitualmente sobre temas de medioambiente y naturaleza para *New York Times*, *Outside* y otras publicaciones.



¿Cómo pueden los gatos hacer enfermar a los osos marinos de Guadalupe que viven en México? La respuesta se halla en el notable instinto de supervivencia del microorganismo. Según Michael Grigg, responsable de la unidad de parasitología molecular en el Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas, en solo diez días un gato recién infectado por *T. gondii* puede liberar con sus heces hasta 100 millones de oocistos, unas pequeñas estructuras reproductoras ovaladas. Cuando un gato infectado defeca en el jardín, o su dueño tira al retrete el lecho usado por su mascota, los oocistos se diseminan en el ambiente. Estos sobreviven sin dificultad en el suelo o en el agua marina. «En el laboratorio, los conservamos en ácido sulfúrico diluido», explica Grigg. «Mantienen su capacidad infectiva hasta diez años.» En teoría, basta un oocisto ingerido, pongamos por caso, con la carne de un molusco, para que un animal marino se contagie. Si tenemos en cuenta que solo en EE.UU. existen unos 70 millones de gatos domésticos y 60 millones de gatos cimarrones, el riesgo se vuelve enorme. Los humanos no contribuimos a este problema porque los oocistos no se dispersan con nuestras heces.

Aunque *T. gondii* puede causar la muerte, lo más frecuente es que debilite a los animales con una infección crónica que los consume lentamente. La enfermedad puede manifestarse cuando el animal sufre estrés asociado a otra dolencia o a algún daño ambiental, como el vertido de aguas residuales. El trabajo de Griggs en el Pacífico nororiental, donde se centra la mayor parte de su investigación sobre polutágenos, ha revelado que más de la mitad de las rapaces y de las aves marinas halladas muertas eran portadoras del parásito *T. gondii*. «Es mucho más de lo que nunca hubiéramos imaginado», comenta.

Cuando un animal adquiere más de una de estas patologías, la combinación de ellas resulta más letal que cada uno de los parásitos por separado. Un estudio de 2011 en el que se analizaron 161 ejemplares de diversas especies de mamíferos marinos varados muertos en el Pacífico nororiental, desde cachalotes hasta marsopas comunes, identificó la presencia simultánea de *T. gondii* y *S. neurona* en el 42 por ciento de ellos.

El problema parece grave, pero resulta difícil afirmar de manera tajante que la incidencia de los polutágenos esté aumentando, porque no se dispone de datos de referencia. Según Grigg, cabe preguntarse también si el efecto podría deberse a la mejor capacidad de detección. Hasta hace 10 o 15 años, nunca se habían buscado patógenos de origen terrestre en animales marinos. Ahora se ha empezado a investigar el fenómeno y Miller, a la cabeza, ha visto demasiadas nutrias marinas muertas como para ignorar el problema. Afirma que el 70 por ciento de ellas son portadoras de *T. gondii*, que, en última instancia, solo puede proceder de un felino. «No creo que pueda ponerse en duda su mayor abundancia», comenta al referirse a los polutágenos. *T. gondii* fue hallado hace poco en belugas procedentes de aguas árticas consideradas impolutas, una suposición dudosa, según se comprobó.



que las percas mantenidas en agua con oxazepam, un ansiolítico, dejaban de nadar en cardúmenes para alimentarse de forma solitaria, un comportamiento peligroso porque vivir en grupo las protege de los depredadores.

BACTERIAS RESISTENTES A LOS FÁRMACOS

La presencia de polutágenos de origen terrestre en el mar no constituye la única preocupación. Algunos de esos microorganismos son resistentes a los medicamentos, un motivo de inquietud para los humanos. Hace pocos años, el Instituto Oceanográfico Woods Hole, en colaboración con otras instituciones, finalizó un estudio pionero basado en 370 animales marinos vivos y muertos hallados entre la bahía de Fundy, en Canadá, y Virginia. Sorprendentemente, tres de cada cuatro animales eran portadores de al menos una bacteria resistente a un antibiótico y el 27 por ciento presentaba bacterias resistentes a cinco o más antibióticos. La mayoría de los microorganismos descritos se hallan también en los humanos. El caso más extremo fue una foca de Groenlandia, que albergaba bacterias resistentes a 13 de los 16 medicamentos ensayados, según afirma la investigadora principal del estudio, Andrea Bogomolni. Entre ellos había antibióticos de uso en agricultura, como la gentamicina, y en ganadería, como la enrofloxacina.

En tiburones de las costas de Belice y Luisiana se han encontrado también bacterias resistentes. Además, en los intestinos de focas comunes muertas en las costas del Pacífico, Raverty ha identificado *Escherichia coli* y *Enterococcus* resistentes a ocho antibióticos de uso común en ganadería. «Ni siquiera en tierra, en los animales de granja, observamos tal grado de resistencia en los mismos microorganismos», afirma.

ORCAS CONTAMINADAS

La intensificación de las investigaciones ha permitido identificar nuevos intrusos en las aguas oceánicas. Hace unos pocos años, algunos expertos que trabajaban en el Pacífico nororiental se preguntaban si la fina película espumosa que cubre la superficie del agua de Puget Sound, conocida como microcapa superficial marina, estaba contaminada y si las impurezas hacían enfermar a las orcas. Cuando las ballenas asesinas ascienden a la superficie para respirar, vaporizan la película y luego la inspiran hasta el interior de sus pulmones, relativamente vulnerables. Un número notable de las orcas halladas muertas durante las últimas décadas presentaba problemas respiratorios.

Para dar con la respuesta, los científicos persiguieron en embarcaciones a las ballenas en peligro de extinción con el objetivo de capturar su aliento en placas de Petri colgadas de un palo. También sumergieron algunas de ellas en la microcapa.

Los cultivos obtenidos en las placas revelaron datos sorprendentes. En ambos tipos de muestra se hallaron bacterias que no pertenecían a ese ambiente, entre ellas un número importante de patógenos humanos, según se publicó en 2009. Se identificaron así cepas de *Salmonella*, una bacteria poco común que se desarrolla en las aguas residuales y causa neumonía en humanos; y *Clostridium perfringens*, una bacteria responsable de intoxicaciones alimentarias. Según J. Pete Schroeder, autor principal del estudio y veterinario de mamíferos marinos de la Fundación Nacional para los Mamíferos Marinos, en San Diego, se describieron en total más de 60 tipos de patógenos, todos ellos con un probable origen terrestre.

El grupo de Schroeder no vincula la contaminación en las orcas y en la microcapa superficial con la muerte de los mamíferos. Sin embargo, las orcas del Pacífico nororiental sufren estrés por numerosos factores, como el ruido generado por las embarcaciones o la reducción de su apreciado salmón real, que debilitan su sistema inmunitario. «Las bacterias están ahí, a la espera de las circunstancias adecuadas. Y las hallan en un animal inmunodeprimido», afirma Schroeder.

Además, existe cada vez más preocupación por las drogas que llegan al océano, desde la cafeína hasta los estrógenos de las píldoras anticonceptivas. En un estudio publicado en febrero de 2013, investigadores de la Universidad de Umeå observaron



LAS NUTRIAS MARINAS halladas moribundas en las costas de California presentaban inflamación cerebral a causa de *Sarcocystis neurona*, un parásito de la zarigüeya de Virginia.

STEVE Y DAVE MASLOWSKI, GETTY IMAGES (*zarigüeya*); MARC SHANDRO, GETTY IMAGES (*nutrias*)

Obviamente, en la naturaleza proliferan varias bacterias resistentes. Pero, de nuevo, los datos son tan recientes que resulta difícil saber si la resistencia se mantiene estable o aumenta. De todos modos, los científicos sospechan que algo anómalo ocurre. Creen que los mamíferos marinos entran en contacto con los antibióticos y con las bacterias resistentes en las plumas de aguas residuales mal depuradas y en los efluentes de grandes

granjas, donde estos medicamentos para el ganado se emplean en exceso.

Según Raverty, las personas que consumen tetraciclina, un antibiótico de prescripción habitual, excretan entre un 65 y un 75 por ciento del medicamento inalterado. Una investigación de Associated Press realizada en 2008 reveló que, solo en Estados Unidos, cada año se desechan varios millones de kilos de medicamentos en el retrete de domicilios particulares, hospitales y residencias de ancianos. En el agua potable de al menos 46 millones de estadounidenses puede hallarse cualquier fármaco, desde antiespasmódicos hasta hormonas sexuales. Si las aguas residuales no se tratan de forma adecuada, estos compuestos pueden acabar en el mar.

La proliferación en el océano de bacterias resistentes a los antibióticos despierta inquietud por diversos motivos. Un surfista o un pescador con una herida abierta, o un nadador que traga agua, pueden adquirir una infección difícil de tratar, afirma Raverty. Y como remarca Bogomolni, la foca de Groenlandia que examinó había sido capturada accidentalmente en una red de pesca, lo que significa «que obtenemos nuestro alimento del mismo sitio de donde lo hace el animal».

Otro motivo de preocupación es la capacidad de los mamíferos marinos de actuar como focos de cultivo: los microorganismos, en especial los virus, crecen y se transforman en ellos hasta que reemergen en los humanos, donde resultan más difíciles de derrotar. Los virus, inmunes a los antibióticos, pueden mutar con rapidez. En 2010, investigadores del Instituto de Investigación Hubbs-SeaWorld en San Diego y sus colaboradores descubrieron astrovirus en varias especies de mamíferos marinos, un patógeno que causa diarrea vírica en niños pequeños y adultos debilitados.

Aún peor fue el descubrimiento de que los astrovirus humanos y de los mamíferos marinos pueden recombinarse (unir su material genético) para formar un nuevo tipo de virus. Aunque Rebecca Rivera, científica de ese instituto, advierte que el nuevo patógeno no va a invadir el medio terrestre de forma inminente, el hallazgo pone de relieve la posibilidad de que los mamíferos marinos devuelvan el golpe a los humanos de forma inesperada. En 2011, por ejemplo, 162 focas comunes de Nueva Inglaterra murieron en una epidemia de neumonía. Según un estudio publicado el año pasado en la revista *mBio*, los animales habían contraído un virus de gripe aviar que ha adquirido mutaciones que incrementan su transmisibilidad y virulencia en mamíferos, incluidos, posiblemente, los humanos.

Otros investigadores se preocupan por los virus humanos que permanecen ocultos hasta que pueden regresar y vengarse. En 2000 se descubrió que las focas comunes de Holanda habían adquirido el mismo virus de la gripe B que había circulado entre los humanos cuatro o cinco años atrás, afirma Albert Osterhaus, del Centro Médico Erasmo de Rotterdam, una eminencia en el estudio de la gripe. Los patógenos pueden pasar de nuevo a los humanos a partir de estos reservorios animales, cuando nuestro sistema inmunitario se halle debilitado y puedan infectarnos nuevamente.

LAS FOCAS COMUNES que murieron en las costas del estado de Washington se hallaban infectadas por *Neospora caninum*, un parásito responsable de abortos de origen infeccioso en el ganado lechero de la Columbia Británica.





Sin embargo, algunos científicos no ven motivos de alarma. Michael Moore, reputado investigador sobre ballenas del Woods Hole que ha participado en algunos de estos proyectos, afirma que los océanos tienen ahora mismo otros problemas: la acidificación y, sobre todo, la captura accidental de mamíferos marinos en las redes de pesca. Moore, que ha manipulado centenares de animales enfermos y muertos, considera estos factores más preocupantes que una oleada de nuevos agentes zoonósicos que pasen del mar a la tierra. Si existiera el más mínimo riesgo procedente del mar, afirma, «ya me habría muerto varia veces».

HUMEDALES AL RESCATE

Tanto si los polutágenos marinos están aumentando como si simplemente son más prevalentes de lo que creíamos, para reducir su presencia debemos averiguar cómo llegan hasta el océano. Los investigadores tienen una idea bastante clara del proceso. Los humanos han derribado las barreras tradicionales entre la tierra y el mar. Cuando la población se establece en una nueva zona elimina los humedales, que funcionan como grandes riñones naturales para los contaminantes, comenta Miller. Y una red cada vez más intrincada de calles, desagües y tuberías a menudo vierte las aguas residuales directamente al mar. Ambos fenómenos dejan pocas opciones a la naturaleza para hacer fluir el agua de escorrentía a través del lecho marino costero, donde puede ser amortiguada y filtrada. Siempre con recursos, los microbios han tomado la delantera. Los cambios ambientales les

ANTHONY LEE, GETTY IMAGES (*vacas*); PATRICK ENDRES, GETTY IMAGES (*foca*)

han brindado la oportunidad de hallar nuevos hogares y multiplicarse, dice Grigg. «Es la evolución en directo», y nosotros contribuimos a ella.

Al transportar nuestros animales allá donde vamos, sean gatos, perros, zarigüeyas o vacas, hemos extendido el problema. Hace pocos años, vararon muertos o moribundos varias nutrias marinas, leones marinos y focas comunes a lo largo de la Columbia Británica y del vecino estado de Washington. Raverty y Grigg descubrieron que estaban infectados por *Neospora caninum*, un protozoo parásito que es la principal causa de abortos de origen infeccioso en el ganado lechero de la Columbia Británica.

Miller opina que el problema se puede resolver, y sin necesidad de matar a todos los gatos domésticos. Debemos preservar los humedales costeros que depuran el agua de escorrentía antes de que llegue al mar abierto. Las grandes balsas de purines de las explotaciones ganaderas no deben verter a los arroyos y ríos que llegan hasta el mar. Algunas medidas simples pueden bastar. Un estudio demostró que, si se introducía una franja de vegetación herbácea entre las zonas de pasto y las ribereñas, se reducían de forma notable los contaminantes que alcanzaban el curso fluvial.

En cuanto a los gatos, los investigadores están intentando desarrollar una vacuna contra *T. gondii*. Hasta dar con una eficaz, el futuro de las nutrias marinas estará en nuestras manos. Miller sostiene que los propietarios deberían mantener a sus mascotas en casa para impedir que defequen en el exterior y esterilizarlas para evitar la proliferación de felinos no deseados. Todos debemos emplear los antibióticos con inteligencia y no tirar los medicamentos sobrantes por el retrete. La mejor manera de deshacerse de los caducados es a través de programas como la Iniciativa Nacional de Devolución en EE.UU. o cualquier otro medio recomendado por el farmacéutico local.

La población también debe reclamar un mejor tratamiento de las aguas residuales de origen humano y ganadero. Debemos filtrar nuestras aguas usadas, dice Gregg, porque la cloración resulta insuficiente. Miller todavía recuerda a su profesor de la escuela primaria cuando afirmaba que «la dilución es la solución para la contaminación». Hoy, nuestros efluentes se vuelven contra nosotros, así como los animales que se encuentran aguas abajo. Afortunadamente, pequeñas acciones pueden generar grandes cambios. Si salvar a una nutria marina no despierta suficiente interés para tratar mejor nuestros residuos, sí debería hacerlo protegernos a nosotros mismos de los polutágenos.

PARA SABER MÁS

A protozoal-associated epizootic impacting marine wildlife: Mass-mortality of southern sea otters (*Enhydra lutris nereis*) due to *Sarcocystis neurona* infection. Melissa A Miller et al. en *Veterinary Parasitology*, vol. 172, n.os 3-4, págs. 183-194, septiembre de 2010.

Polyparasitism is associated with increased disease severity in *Toxoplasma gondii*-infected marine sentinel species. Amanda K. Gibson et al. en *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 5, n.º 5, mayo de 2011.

Human pathogen shown to cause disease in the threatened elkhorn coral *Acropora palmata*. Kathryn Patterson Sutherland et al. en *PLOS ONE*, vol. 6, n.º 8, agosto de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Prevención de pandemias. N. Wolfe en *IyC*, junio de 2009.

Gwenola Graff es arqueóloga en el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) francés y miembro de la unidad mixta de investigación PALOC (patrimonios locales), del IRD y el Museo Nacional de Historia Natural de Francia.



ARQUEOLOGÍA

El nacimiento de la escritura en Egipto

Los grabados rupestres, las vasijas pintadas o los sellos del Egipto del cuarto milenio documentan la existencia de varios sistemas gráficos precursores de los jeroglíficos

Gwenola Graff

La voluntad humana de registrar mensajes comenzó a manifestarse a finales del Paleolítico, hace unos 35.000 años, con las primeras pinturas rupestres. Las más antiguas que se conocen se encuentran en la cueva de Chauvet, en el sudeste de Francia. En grutas ocupadas en una etapa posterior, como la de Lascaux (unos 18.000 años antes de nuestra era) pueden contemplarse, junto a grandes pinturas de animales, algunos signos no figurativos, como trazos, triángulos abiertos o puntos. Sin embargo, los múltiples estudios que se han llevado a cabo no han sido capaces de interpretar su significado. Se han descubierto asimismo otros sistemas de signos en diversas partes del mundo, muy especialmente en Egipto, elaborados sobre soportes de varias clases, como paredes rocosas, recipientes y huesos.

Aquí denominaremos tales conjuntos de signos «sistemas gráficos». Todos ellos siguen una serie de reglas, tanto en lo tocante a confección de cada elemento como a sus posibles combinaciones. Pero ¿podemos hablar de escritura? Existe un vivo debate al respecto, sobre todo en lo que se refiere a los signos no figurativos. La hipótesis clásica sostiene que la escritura nació de manera independiente en Egipto, hacia el año 3250 a.C., y en Mesopotamia, unos 200 años más tarde, así como en China y América —en el mundo maya— durante el primer milenio antes de nuestra era. Por su parte, la escritura protoelamita habría surgido en la meseta iraní aproximadamente al mismo tiempo que en Mesopotamia, pero hasta el momento no ha sido descifrada. ¿Existen otros lugares y épocas a los que quepa atribuir la invención de la escritura?

Una de las causas de la polémica reside en la falta de consenso sobre la noción de escritura. Aquí propondré y utilizaré una definición basada en trabajos recientes de diversos especialistas, para, a continuación, presentar una serie de sistemas gráficos egipcios sobre los que llevo investigando desde principios de este siglo y que comienzan a entenderse mejor. Veremos también que, aunque tales sistemas no puedan considerarse verdaderas escrituras, sí constituyeron una especie de experimento previo.

En un artículo publicado en 1993, el egiptólogo Pascal Vernus definió la escritura como un sistema de signos capaz de codificar enunciados lingüísticos para formar un mensaje, el cual —siempre y cuando se conozca el código— debe poder descifrarse fuera de su contexto de producción (es decir, en otro momento y lugar,

EN SÍNTESIS

Los escritos egipcios más antiguos conocidos se remontan al año 3250 antes de nuestra era. En esa época ya existían varios sistemas gráficos: conjuntos estructurados de signos en soportes diversos, como rocas o vasijas.

Los egipcios se acostumbraron a atribuir un sentido a esos signos gráficos con independencia de su soporte y a asociarlos entre sí de acuerdo con reglas precisas.

La innovación que dio lugar al nacimiento de la escritura fue otorgar un carácter fonético a los signos gráficos. A su vez, eso contribuyó a que un mensaje pudiese ser descifrado fuera de su contexto de producción.



ANTERIORES A LA ESCRITURA: Las vasijas decoradas aparecieron en torno al año 3700 a.C., más de cuatro siglos antes de que surgiera la escritura. Esta escena evoca la renovación de la vida tras la muerte. Su elemento principal, la piel de un animal extendida sobre unos bastones, en la parte inferior, alude a un rito del quinto milenio consistente en envolver en una piel al difunto. Los elementos secundarios quedaban determinados por ciertas reglas de asociación. Estos sistemas gráficos constituirían una etapa esencial hacia la invención de la escritura.

y por parte de personas distintas del escriba y que no tengan las mismas referencias culturales). A principios de este siglo, John Baines, de la Universidad de Oxford, señaló que la escritura debe registrar información. En una obra publicada en 2001, Anne-Marie Christin, de la Universidad París-Diderot, indicaba que la escritura une «dos modos de comunicación heterogéneos y complementarios, que ya la precedían desde una etapa muy anterior: la imagen [...] y la lengua». Precisaba asimismo un requisito fundamental, ya señalado por Jean-François Champollion a principios del siglo XIX: la escritura debe restituir los sonidos de una lengua.

En efecto, resulta imposible descifrar un texto escrito si no se conoce la lengua subyacente. No ocurre así con los logogramas (sistemas en los que un signo representa un objeto), cuyo significado puede entenderse con independencia del idioma. En el caso de los sistemas de escritura más antiguos, su desciframiento solo fue posible gracias al parentesco entre las lenguas que transcribían y otras que aún se hablaban. Así, Champollion comprendió que el copto, la lengua litúrgica de los cristianos egipcios, derivaba del antiguo idioma del país (mientras que el hablado en su época, el árabe egipcio, era el de los invasores del siglo VII) y, gracias a ello, pudo reconstruir de manera aproximada la lengua egipcia antigua y descifrar los jeroglíficos. En cambio, el protoelamita iranio continúa siendo imposible de descifrar, pues ignoramos la lengua que transcribe.

En Egipto, la escritura apareció a finales del cuarto milenio antes de nuestra era. Las inscripciones jeroglíficas más antiguas que se conocen fueron descubiertas en 1986 por el equipo del arqueólogo Günther Dreyer en la tumba U-j, de la necrópolis de Umm al-Qaab, en Abydos, perteneciente al rey Escorpión. Dichas inscripciones se encontraban en pequeñas etiquetas de hueso, madera y marfil, adosadas a jarras. Son muy breves y apenas contienen unos pocos signos; en ocasiones, uno solo.

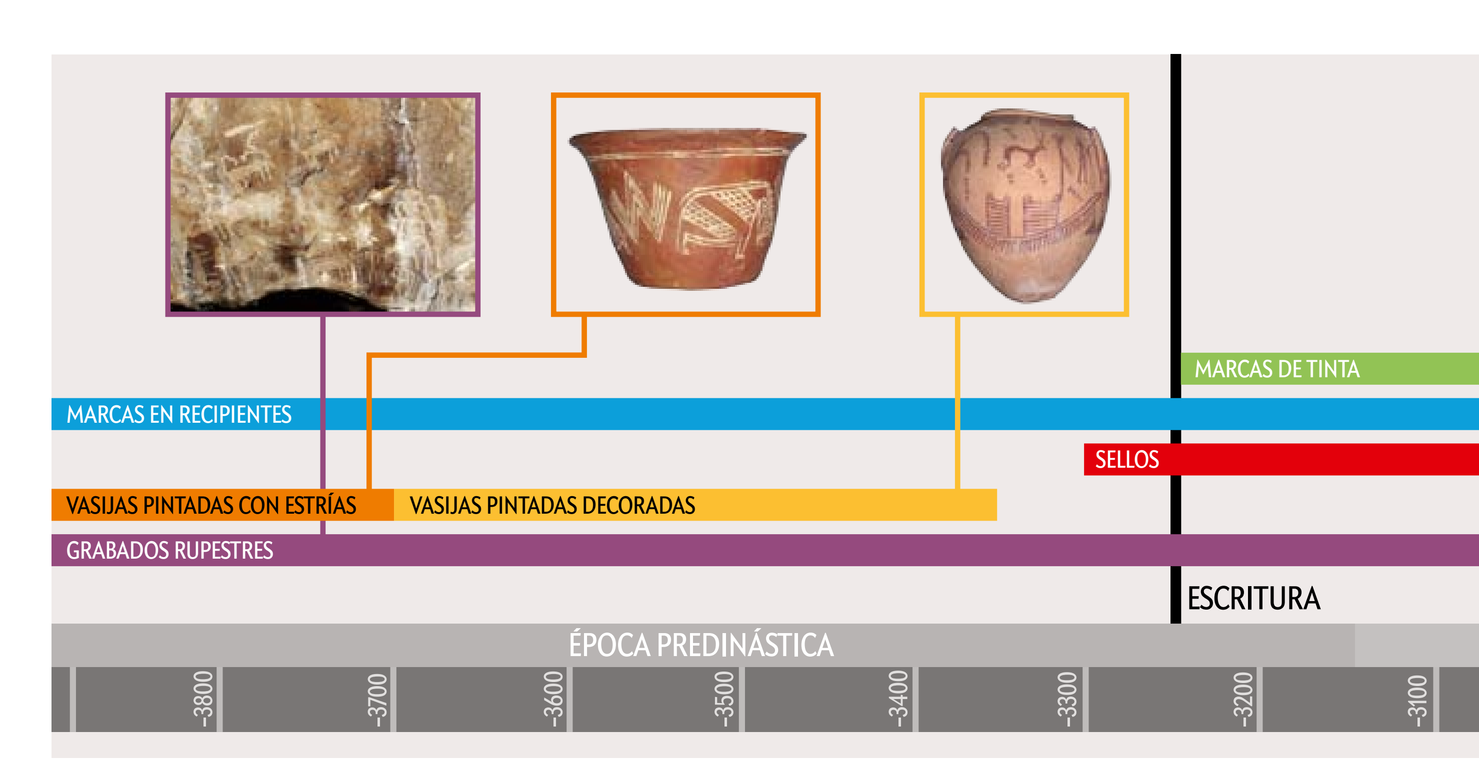
Los jeroglíficos son figurativos; es decir, incluyen elementos fácilmente identificables. Aunque no seamos capaces de leerlos, podremos reconocer en ellos una vaca, una mano, un hombre sentado o una escalera. Sin embargo, tales elementos no siempre significan lo que representan, pues algunos de ellos poseen un valor fonético. En uno de los jeroglíficos de la tumba U-j, por ejemplo, puede verse una cigüeña junto a una silla. En egipcio, cigüeña se decía *ba*, y silla, *set*. Baset era el nombre de una antigua ciudad del norte de Egipto. Así pues, el jeroglífico no significa «la silla del ave», sino que, por medio de los sonidos correspondientes, remite a una realidad desligada de los objetos representados. En los casos ambiguos, para precisar que un signo figurativo debía leerse fonéticamente, se añadía tras él un pequeño trazo.

SISTEMAS GRÁFICOS

Cuando nace la escritura en Egipto, cinco sistemas gráficos habían visto ya la luz: grabados rupestres, pinturas sobre vasijas, incisiones en recipientes (también conocidos como *potmarks*), sellos y marcas de tinta. Se han encontrado varios de ellos en la tumba U-j, junto con los primeros escritos. Algunos fueron utilizados durante varios siglos; otros, en cambio, cayeron en desuso con mayor rapidez. Parecían desempeñar distintas funciones: contable, ritual, política o funeraria. A continuación los describiremos con mayor detalle.

Los grabados rupestres se han encontrado en formaciones rocosas del desierto. Aparecen tanto al oeste del Nilo, en el Sáhara, como a su lado oriental. Las más antiguas, de la región de Asuán (en los yacimientos de Qurta y Wadi Abu Subeira) datan de unos 18.000 años antes de nuestra era; es decir, son contemporáneas de las pinturas de Lascaux. Las rocas grabadas se encuentran por lo general en *wadis*, valles secos excavados por antiguas corrientes de agua, los cuales constituían vías naturales en las travesías por el desierto.

Hasta finales del cuarto milenio antes de nuestra era, las escenas grabadas describen la caza de animales típicos de ese hábitat (antílopes, gacelas, jirafas), la dominación mediante la violencia (combates o matanzas de enemigos) y ritos funerarios. Reflejan una temática recurrente en la época: el control del caos



por parte del orden, simbolizado por el soberano o los dioses. El desierto era una zona fronteriza, de tránsito, peligrosa e incontrolada, razón por la que probablemente surgiese la necesidad de dar testimonio de tales escenas.

En la época faraónica, a partir de 3150 a.C., las vías de paso siguieron estando marcadas por esos grabados. Algunos representaban escenas de navegación, lo que tal vez se debiese a la existencia de travesías por el desierto en las que se transportaban piezas de barcos que luego se ensamblaban en los puertos del mar Rojo. Pese a ello, la mayoría de los grabados de esta época corresponden a inscripciones jeroglíficas realizadas con ocasión de expediciones militares o relacionadas con las explotaciones mineras del desierto. En ellas, se deja constancia del comandante de la expedición, del número de hombres, del faraón reinante o del propósito del desplazamiento.

El segundo sistema gráfico egipcio, empleado entre los años 3900 y 3350 antes de nuestra era, corresponde a escenas complejas pintadas sobre recipientes cerámicos. Aproximadamente hasta 3700 a.C., los principales soportes fueron botellas y grandes copas —semejantes a tazones o platos hondos— de color rojo, las cuales se ornamentaban con pintura blanca. Reciben el nombre de «cerámica cruzada con estrías blancas», o *C-ware* (por *white cross-lined ware*). Más tarde, entre 3700 y 3350 a.C., las cerámicas más usadas fueron recipientes de unos quince centímetros de alto, de color beis rosado y decorados con pintura marrón o rojo violáceo. Se conocen como «cerámica decorada» (*D-ware* o *decorated ware*).

En la cerámica con estrías blancas, las pinturas se repartían de manera más o menos aleatoria por la superficie del recipiente. En la cerámica decorada, en cambio, su distribución obedecía a ciertas reglas de composición. Los elementos que determinaban la puesta en escena se situaban en la mitad superior del objeto, entre las dos asas, y se pintaban en primer lugar. El resto se añadía más tarde y se emplazaba en relación con los anteriores.

Los elementos representados en la segunda época resultan mucho menos variados que los de la primera. Muy estructurados, ya no hay lugar para la improvisación o la fantasía. Los signos se organizan casi siempre en torno a dos motivos: una mujer vista de frente, con los brazos sobre la cabeza y situada junto a un addax (un gran antílope del desierto), o un árbol junto a la piel de un animal extendida sobre bastones cruzados. Se han descubierto unos 60 recipientes con la combinación mujer-addax, así como unos 85 con la pareja árbol-piel. Dichas representaciones no aparecen nunca juntas en un mismo recipiente. Cada motivo constituye el elemento dominante y el que determina los elementos secundarios, elegidos en función de ciertas reglas de asociación. Un barco, una línea ondulada (símbolo del agua) o triángulos con su interior pintado (montañas) pueden acompañar cualquiera de las dos parejas. En cambio, los íbices (cabras salvajes de largos cuernos) y las figuras masculinas aparecen, sobre todo, con la pareja mujer-addax.

DE LAS ESCENAS A LA SINTAXIS

Las escenas pintadas sobre las cerámicas con estrías blancas representan la caza de grandes animales acuáticos (hipopótamo y cocodrilo), diferentes paisajes (zonas semiáridas, estepas o zonas húmedas) o personajes masculinos que dominan a otros grupos humanos, las llamadas «escenas de la victoria». En la cerámica decorada aparecen escenas de navegación, desfiles de animales (antílopes, gacelas o avestruces) y ritos de regeneración. Traducen la preocupación de los egipcios de la época por la renovación de la vida tras la muerte, que imaginaban como el retorno del difunto a una forma embrionaria; al permanecer en este estado, se evitaba un nuevo ciclo de nacimiento y de muerte. Más tarde, durante la época faraónica, se consideraría que el alma del difunto podía descansar en una especie de paraíso, los «campos de Ialu», tras haber sido juzgada por el tribunal de Osiris.

Las vasijas pintadas evocan esas escenas, pero no las explican como lo haría un texto escrito. Quien las observa debe conocerlas para poder comprenderlas. Los elementos representados permiten recordarlas y, después, recomponerlas a partir de lo que ya se sabe. Estos recipientes ornamentados con escenas



EN EGIPTO, cinco sistemas gráficos precedieron a la aparición de la escritura (*barra negra*): grabados rupestres (en rocas del desierto, *violeta*), pinturas sobre cerámicas (*anaranjado oscuro y claro*), incisiones en vasijas (*azul*), sellos (objetos pequeños cuyo relieve se imprimía en tabletas de arcilla o en tapas de jarra, *rojo*), y marcas de tinta (también sobre vasijas, *verde*). Cada uno servía para diferentes funciones: contable, ritual, política o funeraria.





SE CREE QUE LA ESCRITURA fue inventada por un grupo de funcionarios de la administración real en Abydos, antigua capital del Alto Egipto, hacia el año 3250 antes de nuestra era. Aunque más tarde la corte se trasladó a Menfis, cerca de El Cairo, Abydos continuó siendo un importante centro religioso dedicado al culto de Osiris. La imagen muestra un templo iniciado por el faraón Sethi I que fue terminado por su hijo Ramsés II en el siglo XIV a.C.

complejas desaparecieron rápidamente un siglo antes de que apareciese la escritura.

El tercer sistema gráfico queda constituido por marcas incisas en recipientes de arcilla, las cuales se tallaban sobre la superficie externa de las jarras antes de cocerlas. Aparecieron en Egipto a principios del Neolítico, hacia el sexto milenio antes de nuestra era. Proliferaron a partir del año 3200 a.C. y dejaron de usarse unos 300 años después. Por lo general, constaban de un solo signo o de la combinación de unos pocos (raras veces más de cuatro), que representaban animales, partes del cuerpo humano, cuerpos celestes, herramientas, elementos arquitectónicos o formas geométricas. Se conocen centenares o incluso miles de ellos. Más tarde, algunos se convertirán en jeroglíficos, si bien no todos. En ciertos grabados de este tipo pero ya posteriores a la invención de la escritura se identifican también *serejs*: representaciones de la fachada del palacio real en cuyo interior se inscribía el nombre del soberano reinante.

Las combinaciones de signos parecen seguir reglas de asociación y de exclusión. Según Edwin van den Brink, del Servicio Israelí de Antigüedades, pueden asimilarse a una gramática, en el sentido de que conforman un conjunto de reglas metódicas y arbitrarias que se aplican a un sistema de signos. Aquí preferiremos hablar de sintaxis, a fin de reservar el término *gramática* para los textos escritos. En cualquier caso, aún se necesitan trabajos complementarios que determinen con precisión las mencionadas reglas.

FUNCIONES ADMINISTRATIVAS Y FUNERARIAS

Las marcas en recipientes desempeñaban una función contable, ya que siempre se encontraban sobre jarras que contenían productos. Parecen haber sido utilizadas por las administraciones para gestionar el transporte de bienes a lo largo de grandes distancias. Aunque se ignora su significado preciso, se sabe que no correspondían al propietario, al contenido, al continente ni a la procedencia de las jarras.

De los cinco sistemas gráficos considerados aquí, únicamente los sellos no proceden de Egipto. Eran pequeños objetos de piedra o marfil y de unos pocos centímetros de altura que se utilizaban para imprimir una marca en una tabla de arcilla o sobre la tapa de una jarra. De origen mesopotámico, llegaron a Egipto hacia finales del cuarto milenio antes de nuestra era, donde se emplearon durante casi mil años. Se ha encontrado un número escaso de estos sellos en el valle del Nilo, pero abundan las tablillas que llevan su marca. Los sellos egipcios más antiguos se han hallado en la necrópolis U de Abydos, donde se descubrieron los primeros documentos escritos. La iconografía que aparece en ellos es mesopotámica. En torno al año 3000 a.C., los egipcios adoptaron las imágenes que aparecían en estos sellos y las sustituyeron por temas propios.

¿Para qué servían los sellos? Las marcas que dejaban sobre las tablas de arcilla eran permanentes. Equivalían a un recibí que daba cuenta de los intercambios de bienes que, al ser transportados a larga distancia, probablemente pasaban por varios intermediarios entre el expedidor y el destinatario. Los sellos indicaban quiénes eran estos últimos y avalaban las diferentes etapas de la transferencia. Al igual que las marcas de los recipientes, estuvieron ligados al desarrollo de las administraciones reales, tanto en Mesopotamia como en Egipto, así como al comercio de mercancías de valor (aceite, textiles, vino, etcétera). Prueba de ello es el hallazgo de sellos egipcios en Nubia (entre el Egipto y el Sudán actuales) y Palestina, socios comerciales del país.

Cabe señalar que, si bien los primeros sellos informaban sobre el propietario y el destinatario de las mercancías, no constituían por ello el soporte de un texto escrito. Así, un rey-sacerdote mesopotámico podía aparecer representado por una marca específica, como la silueta de un árbol o de un animal. En cambio, los sellos elaborados en una etapa más tardía sí contenían inscripciones jeroglíficas que, en ocasiones, mencionaban un nombre o un título. Los encontrados en Guiza, por ejemplo, llevan los nombres de Keops y Kefrén, que reinaron a mediados del tercer milenio antes de nuestra era.

El último de los cinco sistemas gráficos empleados en Egipto lo hallamos en las marcas de tinta que adornaban ciertas piezas cerámicas encontradas en sepulturas. Las más antiguas, de hacia

el año 3250 a.C., han sido descubiertas en jarras de la tumba U-j. Las más recientes proceden de las galerías subterráneas de la pirámide del faraón Djoser, en Saqqara, y han sido datadas en torno a 2640. Guardan poca semejanza con los primeros jeroglíficos, grabados en las etiquetas de una jarra hallada en la misma tumba. Las inscripciones son muy breves, con un solo signo o un escaso número de ellos, los cuales carecen de equivalente en los restantes sistemas gráficos y no pueden leerse fonéticamente. Conforman un sistema de notación distinto de la escritura y que aún no se comprende bien.

LA LIBERACIÓN DEL SIGNO

Todos sistemas gráficos que hemos presentado aquí exhiben notables diferencias. Ello se debe a la organización de los signos y, en parte, a sus diferentes usos (contable, en el caso de los sellos y las marcas en recipientes; o ritual, político y funerario en los grabados rupestres, las vasijas decoradas y las marcas de tinta). En cualquier caso, los sistemas previos a la invención de la escritura introducen ya algunos de los aspectos esenciales de esta última.

En el caso de los más antiguos, el soporte parece crucial: la forma tridimensional del objeto sobre el que se encuentra la ilustración desempeña un papel en el mensaje. A veces, los grabados rupestres integran esa forma en la escena. En algunos de ellos se representa a los animales como si entraran o salieran de fisuras existentes en la roca, a fin de simbolizar el paso de un mundo al otro. En las vasijas pintadas, la disposición de los signos sobre el soporte y su ubicación relativa (uno encima de otro, en un lugar más o menos visible) tienen también un sentido. Algunos recipientes imitaban el aspecto de un animal, como uno con forma de hipopótamo sobre el que se habían pintado los arpones utilizados para cazarlo.

La importancia del soporte disminuye hacia finales del cuarto milenio. Esa evolución comienza con las marcas en re-

SISTEMAS DE ESCRITURA

Egipto y Mesopotamia: orígenes independientes

Los textos mesopotámicos más antiguos que se conocen corresponden a tablillas encontradas en el templo de Eanna, en Uruk, datadas hacia el año 3100 antes de nuestra era. Fueron consideradas las muestras de escritura más antiguas de la humanidad hasta que, en 1986, se halló la tumba del rey Escorpión, en Abydos. Los escritos descubiertos allí, fechados en torno a 3250 a.C., obligaron a adelantar varios siglos el origen de la escritura en Egipto.

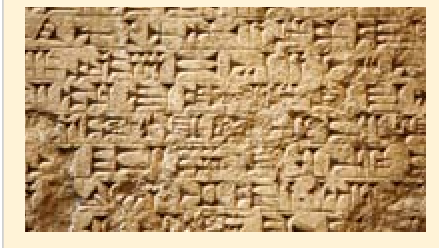
Una hipótesis clásica atribuía un origen mesopotámico a la escritura egipcia. Sin embargo, mientras que esta última es heredera de sistemas gráficos complejos, la mesopotámica cuenta con precedentes más simples: los únicos conocidos son los *calculi* (fichas de arcilla utilizadas para contar cabezas de ganado) y los sellos. Por otra parte, la escritura egipcia siguió siendo figurativa. En Mesopotamia, en cambio, la forma de los signos se diferenció rápidamente de los elementos que representaba, con lo que los primeros se convirtieron en caracteres abstractos. La escritura mesopotámica recibe el nombre de cuneiforme, del latín *cuneus* («cuña»), debido a la forma de sus signos y a la de la herramienta empleada para grabarlos en la arcilla fresca.

Un segundo argumento contra la hipótesis del origen mesopotámico de la escritura egipcia se debe a la relación de cada una con su respectiva lengua. Todo sistema de escritura tiende a transcribir los sonidos del idioma con el que se halla emparentado. Sin embargo, el egipcio antiguo y el sumerio (la lengua de la escritura protocuneiforme, hablada por la civilización más antigua de Mesopotamia) muestran grandes diferencias; en particular, no comparten los mismos sonidos. Así, parece poco probable que los egipcios adoptaran un sistema de escritura que, creado para una lengua ajena, se encontraba muy poco adaptado a la suya.

Un examen de los respectivos sistemas numéricos, utilizados en buena parte de los escritos que aún se conservan, confirma también las diferencias. Dependiendo de la clase de objeto de la que se tratase, los sumerios contaban en las bases 60 y 120 y, en ocasiones, en base 10. La base 60 se usaba para productos textiles, animales vivos o seres humanos de estatus elevado, mientras que la base 10 se reservaba para los seres vivos (humanos o animales) de nivel inferior. Los sistemas de medida también variaban en función de la categoría de los objetos considerados. En un principio, la escritura cuneiforme empleaba 13 sistemas de medida distintos.

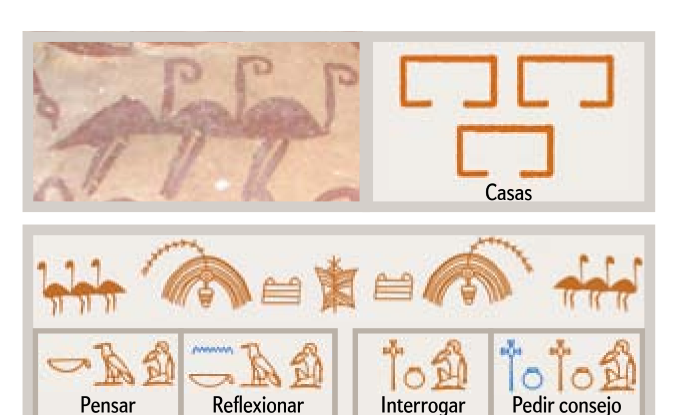
La numeración egipcia, en cambio, utilizaba siempre la base 10 con independencia de la categoría de los objetos, y los sistemas de medida (de superficies, volúmenes, líquidos o pesos) seguían estándares fijos. La unidad usada casi siempre para cuantificar volúmenes (*hequat*, en egipcio antiguo) correspondía al contenido de un cubo de unos treinta litros, con variaciones de unos pocos litros según la región. Y, al igual que nosotros empleamos gramos, kilogramos o toneladas, también en Egipto se empleaban múltiplos decimales de las unidades básicas.

A pesar de todo, la hipótesis de que la escritura egipcia sea deudora de la mesopotámica no ha sido abandonada por completo, pues existen elementos puntuales que atestiguan el contacto entre ambas civilizaciones. Además, puede que futuros descubrimientos hagan retroceder en el tiempo los inicios de la escritura en Mesopotamia. No obstante, cada vez más expertos consideran que en Egipto la escritura fue inventada de manera independiente, probablemente como producto de las labores de un grupo de funcionarios de la administración real en Abydos, la capital de la época, poco antes de 3250 a.C. El estudio de sus sistemas gráficos confirma que hacía ya tiempo que habían emprendido el camino hacia la escritura.





Escritura mesopotámica (*izquierda*) y egipcia (*derecha*). La primera es abstracta; la segunda, figurativa.



CIERTAS REGLAS DE COMPOSICIÓN de las vasijas decoradas seguirían utilizándose en los jeroglíficos. La reproducción por triplicado de un elemento indica el plural sobre las vasijas pintadas (*arriba a la izquierda, avestruces*), así como en algunos jeroglíficos sencillos (*arriba a la derecha, casas*). El sentido de un elemento central se ve precisado o ligeramente modificado por la adición de prefijos o sufijos. En este motivo de una vasija decorada (*centro*), el elemento central evoca un ritual de regeneración; los elementos que lo rodean precisan el contexto ceremonial (construcciones, animales sacrificados). Del mismo modo, en los jeroglíficos (*abajo*), los elementos secundarios (*azul*) introducen varios matices: *pensar*, por ejemplo, se convierte en *reflexionar*.

cipientes, un poco antes de que aparezca la escritura. El objeto se convierte en una especie de cuadro en dos dimensiones, un cambio que permite que el signo se libere: poco a poco, este pasa a ser considerado como un todo en sí mismo, y no como una parte de un conjunto en el que va incluido el soporte. Los signos se sitúan uno tras otro en una línea o en pequeños grupos compactos más o menos rectangulares. En el caso de las representaciones sobre recipientes (ya se trate de incisos o de trazos de tinta), estas solo ocupan una pequeña parte del espacio disponible.

Por otra parte, los sistemas gráficos proporcionaron algunas reglas sintácticas a la escritura. Ciertas normas a las que se ajustan los recipientes pintados se encuentran también en la gramática de los jeroglíficos. En estos, al igual que en la cerámica decorada, el plural se expresa mediante la triple reproducción de un mismo signo; un addax dibujado tres veces equivale a un plural indiferenciado. El significado de una palabra también podía modificarse mediante la adición de un prefijo o un sufijo. En un vaso pintado, la escena evocada se matizaba en función de los elementos que rodeasen al elemento central. De manera análoga, el jeroglífico *kai* («pensar») precedido del signo fonético *ne* daba lugar a *nekai* («reflexionar»).

Los sistemas gráficos no constituyen escrituras, por cuanto no cumplen con todos los requisitos que mencionábamos al principio. En particular, no pueden entenderse sin un contexto cultural compartido ni transcriben los sonidos de la lengua egipcia. No obstante, sí puede percibirse en ellos un estadio precursor. Algunos de los signos empleados pueden relacionarse con el origen de los jeroglíficos, por más que esto no ocurra con frecuencia y que la estilización cambie. Su herencia esencial es otra: el hábito de registrar información mediante conjuntos de signos sujetos a determinadas reglas, así como la autonomía del signo con respecto al soporte.

EL ÚLTIMO PASO HACIA LA ESCRITURA

Hacia 3250 a.C. tuvo lugar la innovación determinante que acabaría por conducir a la escritura: la incorporación de un aspecto fonético. Los varios centenares de tabletas encontrados en la tumba U-j utilizan 51 signos de escritura diferentes. Los hay monolíteros, bilíteros y trilíteros; es decir, aquellos que corresponden a un fonema (/a/ o /m/, por ejemplo), dos (/ka/, /st/) o tres (/sab/, /tchr/). De esta manera, se crea un vínculo con la lengua. A partir de ese momento, ya no se requiere un conocimiento previo de la información registrada o de su contexto cultural. El lector ya no se contenta con recordar una historia gracias a una representación que se le insinúa, sino que lee un mensaje nuevo.

Según Ilona Regulski, de la Universidad de Berlín, los determinantes —otra gran categoría de signos en la escritura jeroglífica—, solo aparecen 300 años más tarde. Se trata de signos que se escriben pero que no se pronuncian y que indican la categoría a la que pertenece la palabra (objeto de madera, animal, divinidad...). Permiten precisar el mensaje y eliminar cualquier duda en los casos de homofonía. Sin duda, el vocabulario escrito era tan limitado en su etapa inicial que no existía ninguna ambigüedad que requiriese aclaración.

Los primeros textos egipcios y mesopotámicos no contenían solo palabras, sino también cifras. En ambos casos, las inscripciones corresponden a registros contables. Se enumeraban en primer lugar las mercancías, seguidas por las superficies, los tiempos de trabajo, etcétera. Dichos textos se parecen más a una lista de la compra que a una oda poética.

A partir del tercer milenio la escritura se torna más compleja. Ya no se limita a un sistema gráfico que registra productos comerciales, sino que permite transcribir el discurso oral. Esto se pone de relieve, sobre todo, en los *Textos de las pirámides*, los escritos religiosos más antiguos que se conocen, descubiertos en las tumbas de los faraones que reinaron entre los años 2300 y 2100 antes de nuestra era. Transcriben fórmulas mágicas que se consideraban útiles para guiar y proteger al soberano en su viaje hacia el más allá.

En Egipto, los comienzos de la escritura parecen tener su anclaje en una antigua tradición gráfica, rica y variada. Concebida en un principio como una herramienta alternativa a la memoria o como un sistema que permitía intercambiar información a distancia, no obedece a una invención repentina ni surgida de la nada. A pesar de ello, conoció rápidamente un éxito considerable en todo el mundo, en un proceso que acabaría por modificar profundamente la manera de vivir del ser humano.

PARA SABER MÁS

Les peintures sur vases de Nagada I - Nagada II. Gwenola Graff. Presses Universitaires de Louvain, 2009.

Visible language: Inventions of writing in the ancient Middle East and beyond. Dirigido por Cristopher Woods. Oriental Institute Museum Publications, Universidad de Chicago, 2010. Disponible en **oi.uchicago.edu/research/pubs/catalog/oimp/oimp32.html**

Before the pyramids: The origins of Egyptian civilization. Dirigido por E. Teeter. Oriental Institute Museum Publications, Universidad de Chicago, 2011. Disponible en **oi.uchicago.edu/research/pubs/catalog/oimp/oimp33.html**

Construire l'image, ordonner le réel: Les vases peints du IVe millénaire en Égypte. Gwenola Graff. Errance, 2013.

por Marta Alonso, M.ª Victoria Lozano, Rafael López y M.ª José Alonso

Nanomedicamentos contra el cáncer

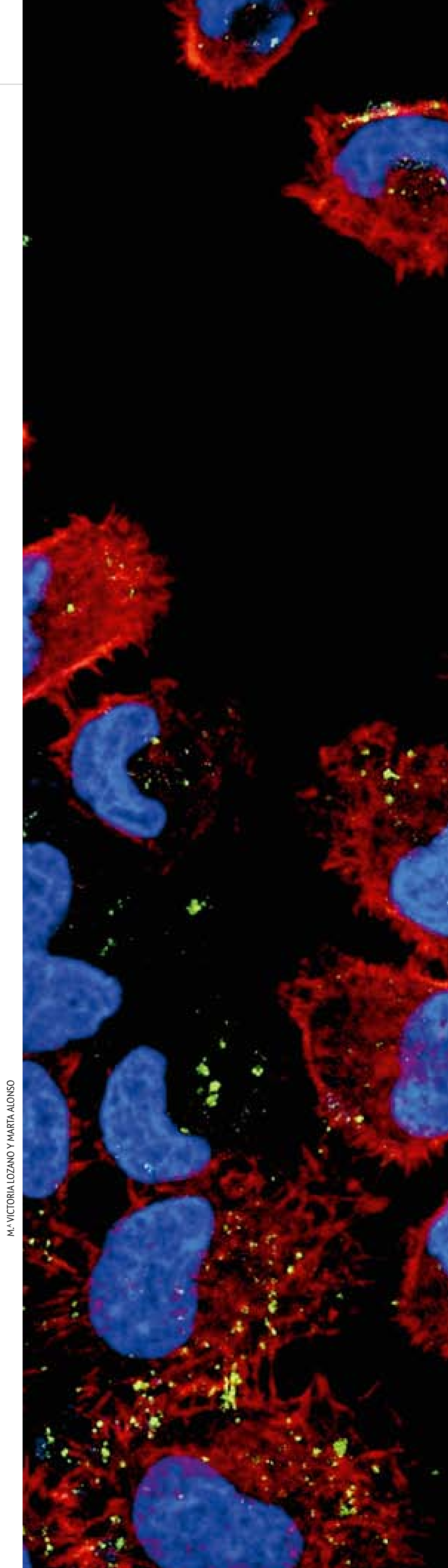
Debido a su afinidad por las células malignas, conllevan una menor toxicidad

El cáncer, uno de los principales problemas de salud pública en el mundo, afecta de forma indiscriminada a personas de todas las edades. Resulta esencial, por tanto, continuar investigando nuevos métodos de diagnóstico y tratamiento. Con frecuencia, los fármacos utilizados en quimioterapia presentan graves efectos secundarios debido a su biodistribución inadecuada y a su limitada capacidad para alcanzar el foco del tumor. Este aspecto se ha visto mejorado de forma notable con la incorporación de la nanotecnología.

La nanotecnología aplicada a la medicina consiste en la asociación de fármacos a estructuras biodegradables de tamaño nanométrico (un millón de veces menor que un milímetro). Estas funcionan como «vehículos» que transportan el medicamento, con lo que se logra una «quimioterapia dirigida» que alcanza preferentemente a las células tumorales. Ello supone un progreso con respecto a la quimioterapia tradicional, ya que aumenta la eficacia de los tratamientos y reduce su toxicidad, lo que mejora la calidad de vida de los pacientes. Estos avances son ya una realidad, puesto que hoy en día disponemos de más de una decena de tratamientos del cáncer basados en la nanotecnología. Como ejemplos podríamos destacar el Doxil®, indicado en el tratamiento del cáncer de ovario o del mieloma múltiple, y el Abraxane®, indicado en el tratamiento del cáncer de mama metastásico o cáncer de pulmón no microcítico.

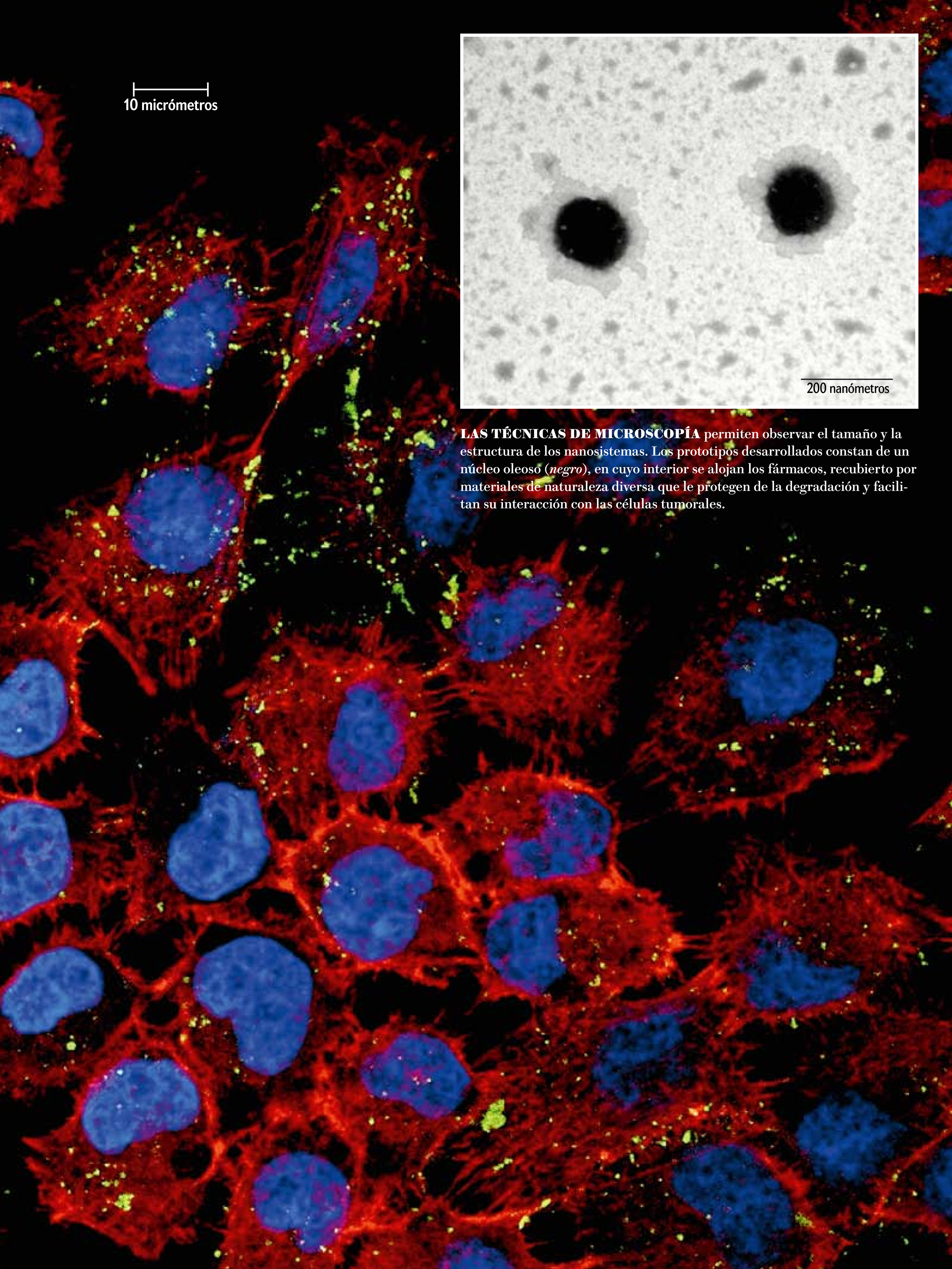
La investigación integrada y multidisciplinar constituye un elemento clave en el desarrollo de nuevas terapias oncológicas. La colaboración entre el grupo de investigación en nanobiofármacos de la Universidad de Santiago de Compostela y el servicio de oncología médica del Hospital Clínico Universitario de la misma ciudad está logrando avances prometedores en este ámbito. La identificación de moléculas características de las células tumorales ha hecho posible el etiquetado de estas últimas, lo que ha permitido diseñar nanosistemas capaces de reconocer selectivamente la etiqueta de la población maligna y distribuir en ella el medicamento.

—M.ª Victoria Lozano
Facultad de Farmacia,
Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete
—Marta Alonso, Rafael López y M.ª José Alonso
Instituto de Investigaciones Sanitarias
Santiago de Compostela



M.ª VICTORIA LOZANO Y MARTA ALONSO

LA ENCAPSULACIÓN DE SUSTANCIAS FLUORESCENTES (*verde*) en el interior de los nanosistemas permite su seguimiento en modelos celulares tumorales mediante técnicas de microscopía. En la imagen se observa cómo la partícula se introduce en la célula, cuyo núcleo y microtúbulos han sido marcados con fluorescencia (*azul* y *rojo*, respectivamente). De este modo, se logra la liberación localizada de los fármacos antitumorales.



LAS TÉCNICAS DE MICROSCOPÍA permiten observar el tamaño y la estructura de los nanosistemas. Los prototipos desarrollados constan de un núcleo oleoso (*negro*), en cuyo interior se alojan los fármacos, recubierto por materiales de naturaleza diversa que le protegen de la degradación y facilitan su interacción con las células tumorales.

por Josep Corcó

Josep Corcó es profesor de filosofía de la ciencia en la Universidad Internacional de Cataluña.



El universo creativo de Popper

La idea de creatividad conecta la epistemología y la cosmología popperianas

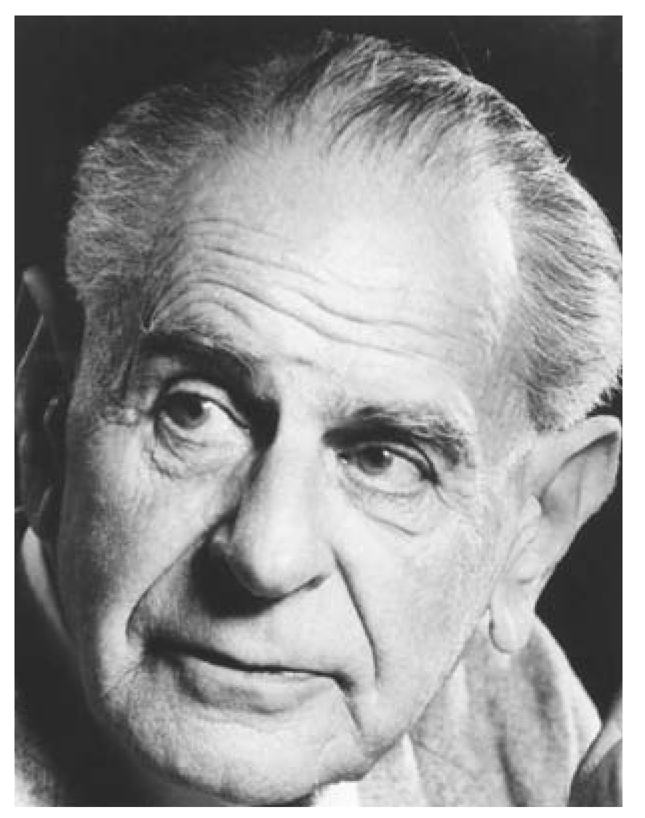
Han pasado ya casi veinte años desde la muerte de Karl R. Popper, que se produjo en Londres el día 17 de septiembre de 1994. En el ámbito de la filosofía, veinte años son pocos para hacer valoraciones generales sobre el pensamiento de un autor. Por tanto, no voy a realizar aquí un balance de la posición que ocupa Popper en la filosofía del siglo xx, sino a explorar uno de los conceptos centrales de su pensamiento: el de creatividad.

La filosofía de la ciencia de Popper es muy conocida. Su cosmología, en cambio, no tanto. Sin embargo, ambas guardan una estrecha relación. Existe una profunda unidad en el pensamiento de este autor sustentada sobre el concepto de creatividad, presente en su epistemología, así como en su cosmología.

En cuanto a sus tesis epistemológicas, es sabido que Popper piensa que el progreso científico no consiste en conseguir conocimientos definitivos acerca de la realidad. Para él, todo conocimiento científico es hipotético, y el progreso en las ciencias se basa en la sustitución de teorías refutadas por nuevas teorías, que son fruto, asimismo, de la creatividad de los científicos.

También en su cosmología la creatividad desempeña un papel central. Según Popper, el mundo se caracteriza por hallarse en evolución emergente. Es decir, en él aparecen novedades que, con frecuencia, no pueden predecirse a partir de los estadios precedentes. Lo que sugiere para explicar la evolución natural no es ni el determinismo ni el azar. Popper propone la existencia de propensiones o tendencias reales.

Dado un estado inicial, existen varias situaciones futuras posibles; situaciones que responden a criterios lógicos (no son contradictorias) y naturales (cumplen las leyes de la naturaleza). Sin embargo, no todos los nuevos escenarios posibles tienen la misma «fuerza»: existe una disposición o tendencia real hacia algunos de ellos (una semilla de roble posee una tendencia natural a brotar, desarrollar ramas, tronco y raíces). Todo sistema natural es, por tanto, fruto de la realización, o actualización, de unas propensiones anteriores. La actualización de ciertas propensiones, y no de otras, depende de un conjunto de circunstancias que, en muchas ocasiones, la convierten en impredecible. Y esa realización trae consigo la emergencia de nuevas propensiones. Según Popper, esta perspectiva resulta válida ya en el nivel de la física fundamental (partículas subatómicas) y se extiende a otros dominios, como la química (moléculas) y la biología (organismos). Por ejemplo, cada compuesto bioquímico que se forma crea posibilidades de sintetizar otros nuevos que antes no existían ni podían producirse.



WIKIMEDIA COMMONS/LSE LIBRARY

Así pues, en la perspectiva popperiana, la creatividad no es una prerrogativa del ser humano. Popper rechaza la contraposición entre un mundo natural determinista, en el que no cabe la novedad, y un ser humano capaz de crear gracias a su libertad. Afirma que el universo es creativo, que en su evolución emergen auténticas novedades. La palabra *evolución* podría hacer pensar en el desarrollo de algo preformado, que de alguna manera estuviera presente desde el principio. Popper sostiene, por el contrario, que en la evolución se dan novedades reales, «en el sentido en que se puede considerar nueva una obra de arte», afirma.

Popper sostiene que las mayores innovaciones en la evolución del universo han aparecido con la emergencia de la vida. Es así porque la vida ha traído una novedad respecto de toda la evolución cósmica anterior: la aparición de unos seres con problemas y que tratan de resolverlos activamente. Popper establece así una distinción clara entre el mundo inorgánico y el mundo orgánico: solo los organismos tienen problemas. Si bien el principal sería

la supervivencia, se enfrentan a muchos otros, siendo uno de los más importantes la búsqueda de mejores condiciones de vida, de un mundo mejor.

No repasaremos aquí la compleja trayectoria del pensamiento de Popper sobre la teoría darwinista de la selección natural. Nos centraremos en el momento en que propone la hipótesis según la cual el comportamiento de los organismos no depende exclusivamente de su genoma. Ello implica que pueden aparecer de vez en cuando organismos que difieran de sus progenitores en su conducta. Este cambio de comportamiento puede deberse a factores distintos del genético: un estado fisiológico momentáneo que responde a cierta combinación de estímulos, un cambio de las condiciones ambientales, etcétera. Un organismo tiene a su disposición un conjunto más o menos limitado de conductas posibles. Si adopta una conducta nueva, cambia su relación con el medio; ello influye en las presiones de selección que ejerce el medio, porque este ya es distinto, al menos en su relación con el organismo.

Popper establece así dos niveles de variación en los organismos: el genético y el conductual. Pero las variaciones conductuales no producen directamente la aparición de nuevas formas. Popper no está proponiendo la transmisión hereditaria de caracteres adquiridos. Sostiene, más bien, que las variaciones conductuales pueden ser creativas en la medida en que determinan nuevas presiones selectivas que se ejercerán sobre las futuras variaciones genéticas. Lo que pretende destacar es que la adaptación al medio la realiza el organismo de manera activa, mediante su conducta. Un comportamiento rígido dificultaría nuevas adaptaciones y, en definitiva, la aparición de novedades en la evolución biológica. Cuanto mayor sea el margen de variación en la conducta de un organismo, más aumenta la posibilidad de novedades evolutivas.

Como hemos dicho, el problema al que se enfrentan los seres vivos no es simplemente el de adaptarse al medio para sobrevivir. La adaptación no es pasiva, sino activa: el ser vivo, más que adaptarse al medio, procura, con su conducta, adaptar este a sus intereses y necesidades. El desarrollo de todo este proceso evolutivo no tiene un fin predeterminado. Pero sí responde a una tendencia, la de cambiar el mundo haciéndolo más favorable para la vida. Una tendencia que ha tenido éxito. Según Popper, no hay por qué tener una imagen del mundo físico como algo hostil a la vida, dado que el mundo ya ha sido transformado por la vida y a favor de esta. Además, la actividad de la vida, afirma, ha creado al hombre, y con él un mundo absolutamente nuevo, el mundo de los contenidos del pensamiento humano.

La conceptualización que Popper realiza del ser humano le conduce a proponer la teoría de los tres mundos: (1) el mundo físico, (2) el mundo de los estados mentales o de consciencia y (3) el mundo del conocimiento objetivo, donde habitan, por ejemplo, las teorías científicas. Los razonamientos de Popper buscan demostrar la existencia peculiar, pero real, del mundo 3 —a pesar de todas las críticas que esta posición ha generado—. Que el mundo 3 interactúe con el mundo 1 es, para Popper, una prueba de su existencia o realidad. Ahora bien, el mundo 3 no interactúa directamente con el 1, sino solo de forma indirecta, a través del 2. Los objetos del mundo 3 han de ser captados por la mente humana para tener una eficacia en el mundo físico. Popper considera obvia la influencia, por ejemplo, de las teorías científicas sobre el mundo 1. Una influencia suficiente para establecer la realidad del mundo 3.

Lo que sugiere Popper para explicar la evolución natural no es ni el determinismo ni el azar. Propone la existencia de propensiones o tendencias reales

El mundo del conocimiento objetivo es producto de la actividad humana. Pero, a su vez, Popper señala la autonomía de este respecto de su productor. Una teoría puede entrañar consecuencias desconocidas para su propio autor o producir problemas nuevos, imprevistos. Ciertas consecuencias y problemas existen sin ser conocidos: no son producidos por el hombre, sino descubiertos por él. El mundo 3 tiene un origen humano, pero presenta, a su vez, un desarrollo propio. Así sucede, por ejemplo, en el territorio de la ciencia: podemos buscar soluciones a un problema científico y encontrar una que aceptamos de forma provisional, pero ello generará de inmediato la aparición de nuevos problemas científicos.

En definitiva, Popper contempla todo lo que existe como el resultado de un proceso evolutivo de carácter creativo. Piensa que la mente humana ha emergido en el curso de esta evolución. Y afirma que existe una continuidad entre la evolución biológica y el conocimiento humano, especialmente el conocimiento científico, porque siguen una misma pauta básica: el método de ensayo y eliminación de errores.

En el caso de la evolución biológica, los ensayos corresponden a los cambios que se producen en los organismos, ya sea a nivel genético o conductual, en vistas a resolver sus problemas; la eliminación del error es llevada a cabo por la selección natural, que suprime los cambios que no resultan adaptativos. En el caso del ser humano, el proceso evolutivo ha producido la emergencia de la mente y de la libertad, que ejerce un doble papel en la actividad científica: los ensayos son las teorías que los científicos crean libremente y la eliminación de los errores se produce por la crítica a la que estas teorías son sometidas por la decisión libre de no aceptar contradicciones.

De los dos momentos del método, Popper subraya la importancia del segundo, la crítica. Sin embargo, aquel por el que manifiesta su admiración es el primero, el momento creativo.

PARA SABER MÁS

Novedades en el universo. Josep Corcó. EUNSA 1995.

Karl Popper. A centenary assessment (vol. I: Life and times, and values in a world of facts); (vol. II: Metaphysics and epistemology); (vol. III: Science). Dirigido por Ian Jarvie, Karl Milford y David Miller. Ashgate 2007.

Karl Popper's philosophy of science. Rationality without foundations. Stefano Gattei. Routledge, 2009.

Poper's critical rationalism. A philosophical investigation. Darrell P. Rowbottom. Routledge, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Karl R. Popper: Debate crítico con la inteligencia. John Horgan en *IyC*, enero de 1993.

El concepto de ciencia en Popper. Andrés Rivadulla en *MyC* n.º 11, 2005.

por Blanca Jiménez Cisneros



Blanca Jiménez Cisneros trabaja en la División de Ciencias del Agua y en el Secretariado del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO.

Gestión desinformada

La escasez de datos sobre la generación, el tratamiento y la reutilización de las aguas residuales dificulta la gestión de este valioso recurso

El pasado mes de diciembre, T. Sato, de la Universidad de Tottori, y sus colaboradores publicaron en *Agricultural Water Management* un estudio internacional, tan interesante como alarmante, sobre la gestión de las aguas residuales. A partir de la revisión de diversas fuentes, entre ellas artículos científicos e informes gubernamentales de países representativos de las diferentes regiones y niveles socioeconómicos del planeta, los autores dieron a conocer que los datos sobre la generación, el tratamiento y la reutilización de las aguas residuales son escasos y deficientes.

De los 181 países estudiados, solo 55 cuentan con datos sobre esos tres aspectos; en 57 de ellos, no hay ningún tipo de información. Además de escasa, la información disponible es poco actual: solo el 37 por ciento corresponde al período entre 2008 y 2012. Los resultados ponen de manifiesto el fracaso de los gestores en la recolección de datos. Ello reviste suma importancia, puesto que estos resultan esenciales para tomar decisiones informadas sobre numerosas cuestiones, desde la gestión de la contaminación hasta el uso de las aguas residuales para remediar la escasez de agua y los posibles impactos negativos del cambio climático. A diferencia de otros muchos recursos naturales, el agua es renovable. Por tanto, en una época en que se promueve el reciclaje de los residuos y los materiales, llama la atención la falta de discusión sobre la generación y, sobre todo, la reutilización de las aguas residuales.

Veamos algunas razones «invisibles» que podrían explicar esta desinformación. Una de ellas es el rechazo inherente al uso de las aguas residuales, ya que se asocian con enfermedades de transmisión hídrica. Otra, que, a diferencia del agua potabilizada, por la cual los usuarios pagan, la residual quizá se considera sin valor y, por tanto, sin interés —¿por qué debería estudiarse?—. Sin embargo, en un mundo en el cual la demanda hídrica se halla en constante aumento, el agua residual —o usada, como prefiero yo llamarla— debiera valorarse y, por tanto, medirse. De hecho, esto ya ocurre en algunas zonas donde el agua escasea y los agricultores deben pagar por el empleo de agua residual.

Mientras los responsables de la gestión hídrica todavía no son conscientes del potencial que encierran las aguas residuales, un gran número de agricultores ya las reutilizan. Tanto las tratadas como las no tratadas se emplean para regar cultivos en varios países; una práctica que va en aumento. Desafortunadamente, el equipo de Sato no ha captado este hecho, por la propia carencia de información y por el empleo de datos posteriores al año 2000. Gracias a la reutilización del agua, los agricultores obtienen de tres a cuatro cosechas al año en lugar de una, como suele ocurrir cuando se riega solo con agua de lluvia. Además, las aguas residuales contienen nutrientes (nitrógeno, fósforo, materia orgánica) que enriquecen el suelo y aumentan su productividad. La sola presencia de estos compuestos debiera ser un aliciente para la reutilización del agua. Las reservas mundiales de fósforo se están agotando a un ritmo acelerado; los productores de este componente esencial de los abonos ya han hecho un llamamiento para que se disminuya su consumo y se recicle. Otra ventaja de reciclar el agua para riego agrícola es que con ello se recargan los acuíferos, que se convierten en una fuente adicional de agua.



Los atractivos de las aguas residuales, sobre todo para los agricultores de regiones pobres, son, por tanto, obvios. Sin embargo, muchas veces se reutilizan de forma inadecuada. Según el estudio mencionado, los países ricos tratan el 70 por ciento del agua residual; los países pobres, solo el 8 por ciento. Asimismo, se estima que el agua sin tratar (cuyo uso agrícola puede transmitir enfermedades diarreicas) se reutiliza entre 5 y 8 veces más que el agua debidamente tratada.

Pero la gestión de aguas residuales no debería centrarse solo en las zonas agrícolas. También las ciudades podrían beneficiarse de este recurso. Si bien conforman una minúscula fracción de la superficie del planeta, presentan una demanda muy elevada de agua y comida, y a la vez generan un volumen notable de agua usada. Buena parte de esta (y los nutrientes que contiene) podría reutilizarse en la producción de alimentos para la población urbana. Se están desarrollando métodos para el tratamiento de aguas residuales más baratos que los estándar y que permiten el reciclaje de nutrientes, y se están adaptando para que resulten rentables a escala local. Pero antes es necesario contar con la información pertinente para diseñar las políticas que permitan su implementación.

Artículo original publicado en *Nature* 502, págs. 633-634, 2013.

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.



Cocina para celíacos

Cada día se elaboran productos sin gluten de mayor calidad organoléptica

La enfermedad celíaca se caracteriza por una inflamación crónica del intestino delgado causada por proteínas del trigo, la avena, la cebada y el centeno. Por lo común, suele simplificarse como intolerancia al gluten (proteína del trigo). Afecta al uno por ciento de la población y en numerosos casos no está diagnosticada.

La notable prevalencia de este trastorno autoinmunitario ha hecho que las autoridades reguladoras hayan establecido reglamentos de protección de los celíacos. La Comisión del *Codex Alimentarius* de la Organización Mundial de la Salud reguló en 2008 la información para el consumidor en los siguientes términos: «contenido muy reducido de gluten» cuando este no supere los 100 miligramos por kilo y «exento de gluten» si el contenido no sobrepasa los 20 miligramos por kilo. Asimismo, la Unión Europea modificó en 2013 reglamentaciones de 2009 y 2011 para obligar a las empresas alimentarias a facilitar información sobre la ausencia o presencia reducida de gluten en sus productos, sin inducir a error o confusión.

Varias investigaciones se han propuesto comprobar la inocuidad de los alimentos para celíacos. En 2012, Victor Zevallos y sus colaboradores, del King's College de Londres, publicaron en *American Journal of Clinical Nutrition* un trabajo donde concluían que 2 de las 15 variedades de quinoa estudiadas contenían concentraciones de elementos tóxicos (para celíacos) suficientes para causar una reacción alérgica en una minoría de las personas sensibles al gluten. Para fortuna de los celíacos, Paola Pontieri, del Instituto de Genética y Biofísica en Nápoles, y su equipo, publicaron el año pasado en *Journal of Agricultural and Food Chemistry* un artículo que demostraba la seguridad del sorgo en las formulaciones sin gluten.

Asimismo, un gran número de empresas y universidades (Alvine Pharmaceuticals, Alba Therapeutics, Universidad de Leiden y Universidad Stanford, entre otras) están llevando a cabo proyectos para mejorar las condiciones de los celíacos. Se están desarrollando vacunas, tratamientos con medicamentos enzimáticos, trigo transgénico sin gluten, etcétera. Sin embargo, los fármacos presentan una seguridad dudosa y los trigos sin gluten son de aplicación cara y compleja, y socialmente polémicos. Lo que parece claro es que existen una serie de condicionantes en el desarrollo de esta intolerancia (predisposición genética, permeabilidad del intestino, factores ambientales y quizás otros todavía desconocidos), que dificultan los tratamientos médico-farmacológicos [*véase* «Causas de la enfermedad celíaca», por Alessio Fasano; Investigación y Ciencia, octubre de 2009].



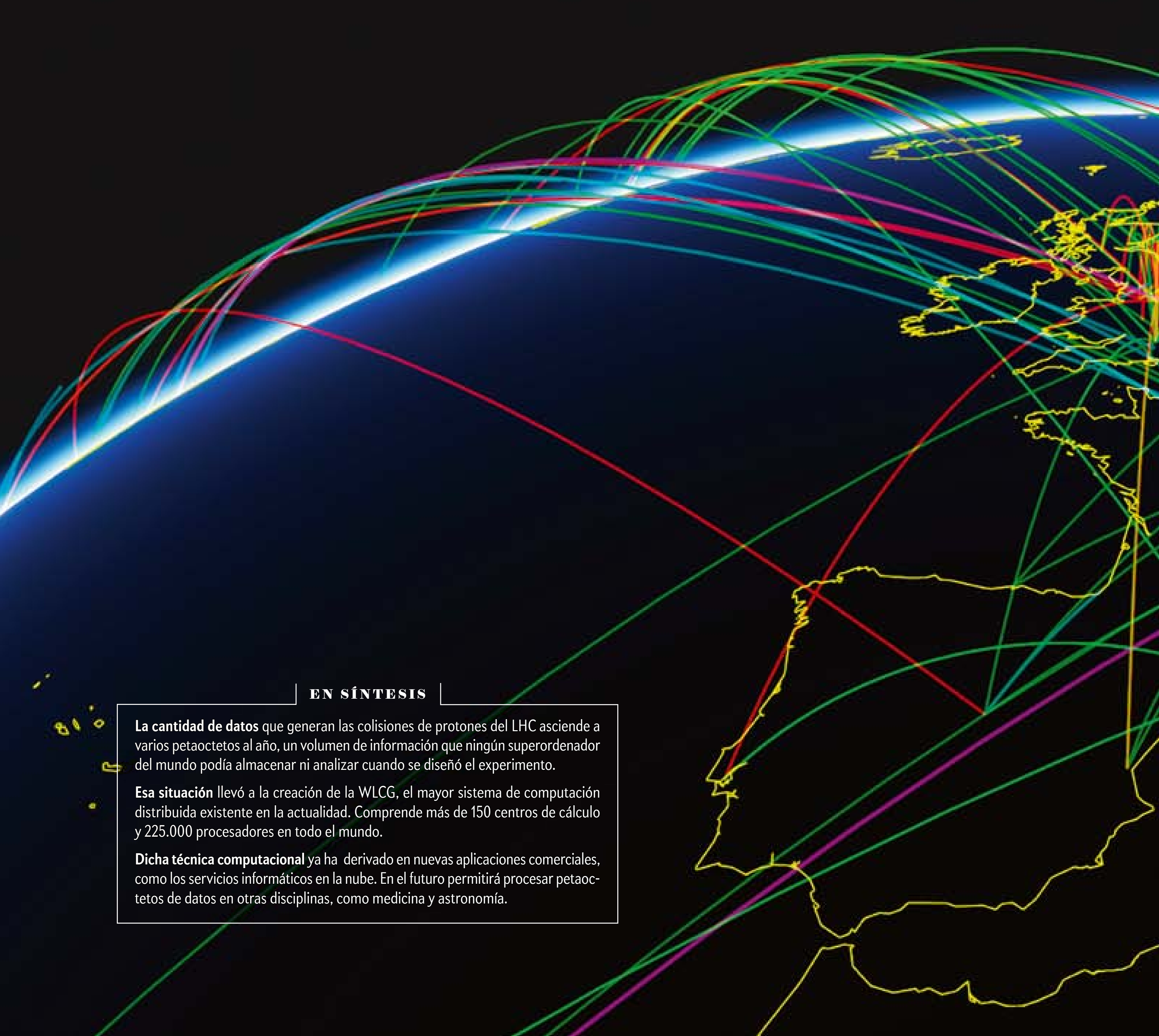
Parece, por tanto, que la mejor solución se halla, por ahora, en una cocina doméstica basada en una gama variada de productos y en una oferta gastronómica adaptada. Mejorar las propiedades organolépticas de los productos sin gluten constituye una de las apuestas de la industria alimentaria. En la Universidad Autónoma de Barcelona se han desarrollado varias propuestas que han propiciado la creación de Celipan, una empresa dedicada exclusivamente a alimentos para celíacos. Grandes áreas comerciales cuentan con zonas de productos específicos. La comida sin gluten ha ganado popularidad y sus ventas han subido en los últimos años, convirtiéndose en un gran negocio.

Al propio tiempo, está arraigando una preocupante percepción social de que estos productos son más saludables. El artículo «Gluten-free diet: Imprudent dietary advice for the general population?», publicado en enero de 2012 por Glenn A. Gaesser, de la Universidad estatal de Arizona, y Siddharta S. Angadi, de la Universidad de California en Los Ángeles, en *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, concluye que las dietas sin gluten están claramente indicadas para los pacientes celíacos o con sensibilidad al gluten, y pueden resultar beneficiosas para las personas con otras enfermedades crónicas autoinmunitarias, pero no para la población general. El mismo artículo aporta pruebas de que una dieta sin gluten puede afectar negativamente a la salud intestinal de los no celíacos.

En el ámbito de la restauración, hace solo unos años la presencia de clientes con intolerancia al gluten creaba problemas de difícil solución. Ni el personal estaba preparado, ni existían productos adecuados ni zonas de trabajo específicas. Hoy, en cambio, son muchos los restaurantes preparados para satisfacer a comensales celíacos; algunos incluso investigan sobre la adaptación de platos tradicionales (como en Les Cols, de Olot, que están desarrollando recetas a base de trigo sarraceno). También se ofrecen cursos especializados y guías para la restauración sin gluten, y los organismos públicos elaboran documentos informativos donde se indican hoteles y restaurantes con menús y cartas específicas para el colectivo celíaco.

El esfuerzo que el sector alimentario está realizando para satisfacer las necesidades de grupos con necesidades dietéticas específicas va llegando al resto de la sociedad. Cada día encontramos más productos de todas las gamas, incluida la quinta (platos listos para comer), de extraordinaria calidad organoléptica, para el consumo de toda la población. También de la celíaca.

Una red global de computación para el LHC



EN SÍNTESIS

La cantidad de datos que generan las colisiones de protones del LHC asciende a varios petaoctetos al año, un volumen de información que ningún superordenador del mundo podía almacenar ni analizar cuando se diseñó el experimento.

Esa situación llevó a la creación de la WLCG, el mayor sistema de computación distribuida existente en la actualidad. Comprende más de 150 centros de cálculo y 225.000 procesadores en todo el mundo.

Dicha técnica computacional ya ha derivado en nuevas aplicaciones comerciales, como los servicios informáticos en la nube. En el futuro permitirá procesar petaoctetos de datos en otras disciplinas, como medicina y astronomía.

El descubrimiento del bosón de Higgs fue posible gracias a una innovadora infraestructura de computación distribuida. Su extensión a otras disciplinas promete revolucionar la manera de hacer ciencia

José M. Hernández Calama y Gonzalo Merino



MÁS DE 200.000 TAREAS SIMULTÁNEAS: Actividad de la Red Mundial de Computación del LHC (WLCG) el 31 de enero de 2014 a las 11:33 CET. Las líneas rojas y verdes indican transferencias de datos entre centros (*rojo, fallida*; *verde, exitosa*); las azules muestran el envío de trabajos a la CPU de ejecución; las rosas, los ficheros que se devuelven al finalizar las tareas. Una aplicación para Google Earth que permite ver el estado de la WLCG en tiempo real puede descargarse gratuitamente en wlcg.web.cern.ch/wlcg-google-earth-dashboard.



José M. Hernández Calama es investigador del experimento CMS del CERN y jefe de la unidad de computación científica en la división de física experimental de partículas del CIEMAT. Ha participado en el desarrollo del sistema de computación de CMS y en el análisis de los datos en la búsqueda del bosón de Higgs.

Gonzalo Merino participó en el diseño de la WLCG desde sus inicios. Entre 2003 y 2013 trabajó en el Puerto de Información Científica de Barcelona como responsable del centro Tier-1 de procesamiento de datos del LHC en España. En la actualidad investiga en la Universidad de Wisconsin-Madison, donde se encarga del sistema informático del detector de neutrinos IceCube, situado en el Polo Sur.

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN es el instrumento científico más complejo jamás construido. Con él los físicos esperan profundizar en las leyes que rigen la naturaleza a escala microscópica, las partículas elementales y sus interacciones. Para estudiar los componentes más pequeños del universo ha sido necesario erigir un experimento descomunal: el LHC consta de un anillo subterráneo de casi treinta kilómetros de longitud en el que operan cuatro detectores de partículas, cada uno del tamaño de un edificio de varias plantas. La escala de energías que puede explorar el LHC no había sido alcanzada antes por ningún otro acelerador. Ello hizo posible que, en 2012, se descubriese la última pieza que faltaba para completar el modelo estándar de la física de partículas: el hoy mundialmente famoso bosón de Higgs.

Sin duda, esa recompensa nunca hubiera sido posible sin años de trabajo por parte de los físicos ni sin todos los avances técnicos logrados por los ingenieros. Pero el éxito del LHC se apoya en un tercer pilar que, si bien menos conocido, se ha demostrado tan esencial como los anteriores: su capacidad computacional para administrar y analizar una cantidad de datos sin precedentes en la historia de la ciencia.

Para detectar la partícula de Higgs, el LHC tuvo que analizar más de mil billones de colisiones entre protones. Desde el principio estuvo claro que ningún centro de computación podría hacer frente por sí solo a semejante cantidad de datos: era necesario desarrollar una nueva infraestructura computacional. Con el objetivo de almacenar, procesar y analizar esos datos se creó la Red Mundial de Computación para el LHC, o WLCG (Worldwide LHC Computing Grid), un sistema basado en técnicas de computación distribuida que hace posible compartir, a través de Internet, la capacidad de cálculo y almacenamiento de cientos de miles de ordenadores en todo el mundo.

El reto computacional al que hubieron de enfrentarse los científicos del LHC dio origen a una de las tecnologías de procesamiento de la información más complejas y eficientes que existen en la actualidad. Desde sus comienzos, dicha infraestructura fue diseñada con el objetivo de ampliar sus horizontes y transformarse en una plataforma multidisciplinar, que diese soporte a otras comunidades científicas con necesidades similares de tratamiento de datos. Y, de hecho, campos como el de la imagen médica o la astrofísica ya han comenzado a explorar la aplicación de técnicas semejantes a gran escala.

No es la primera vez que los retos computacionales en física de partículas impulsan grandes avances técnicos. A ellos debemos nada menos que la World Wide Web, inventada en 1989 en el CERN para facilitar el intercambio de información entre científicos. Sin ella, el mundo actual sería un lugar muy distinto del que conocemos.

Ya en pleno siglo XXI, las nuevas técnicas de computación distribuida han revolucionado la gestión y el procesamiento de enormes cantidades de datos. Con ello están impulsando nuevas formas de hacer ciencia, pues permiten hacer frente a cuestiones hasta hace poco inabordables debido a su complejidad. Y, al igual que ocurriese con la Web, su influencia no se circunscribe al ámbito investigador. Esta nueva manera de procesar la información ha transcendido las fronteras de la ciencia y ha evolucionado hasta lo que conocemos como «computación en la nube», un servicio que ya ofrecen algunas grandes corporaciones tecnológicas. Su gran potencia y versatilidad está ofreciendo a la industria un acceso fácil a ingentes recursos de computación, en lo que supone un nuevo motor de innovación y oportunidades de negocio.

DE LAS COLISIONES A LOS DATOS

En el anillo subterráneo del LHC, de 27 kilómetros de perímetro, los protones se aceleran hasta alcanzar velocidades muy próximas a la de la luz. A esas velocidades de vértigo, las partículas efectúan del orden de 10.000 vueltas por segundo en su particular circuito. Después, los haces de protones se focalizan y se cruzan en los cuatro puntos del anillo donde se sitúan los detectores: CMS, ATLAS, LHCb y ALICE. Los dos primeros buscan nuevas partículas, LHCb estudia la asimetría entre materia y antimateria, mientras que ALICE fue diseñado para estudiar el estado en que se encontraba el plasma primordial de partículas durante los primeros instantes del universo.

La probabilidad de que dos protones colisionen entre sí es ínfima. Por ello, a lo largo del anillo se hacen circular simultáneamente unos 3000 paquetes muy compactos (cada uno con 100.000 millones de protones en unas dimensiones transversales menores que el diámetro de un cabello humano), los cuales se cruzan a un ritmo de 20 millones de veces por segundo. A partir de la energía de la colisión frontal de dos protones se producen

PÁGINAS ANTERIORES: ADAPTADO DE WLCG GOOGLE EARTH DASHBOARD; IMÁGENES Y DATOS: LANDSAT/SIO/NOAA/MARINA DE EE.UU./GEBCO/IBCAO

nuevas partículas. Sin embargo, la probabilidad de que en tales colisiones se produzca un bosón de Higgs es minúscula: inferior a uno entre mil millones. Además, no todos los bosones de Higgs producidos pueden observarse, ya sea porque las partículas en las que se desintegra atraviesan partes no instrumentadas del detector o porque estas no pueden separarse de otros procesos conocidos que dejan la misma señal, lo que reduce la probabilidad de detectarlo en varios órdenes de magnitud adicionales. Por todo ello, resulta necesario hacer colisionar una ingente cantidad de protones.

Entre 2011 y 2012, en el LHC se produjeron unos 1750 billones de choques entre protones, los suficientes para que el esquivo bosón de Higgs acabara asomando la cabeza. Por recurrir a un símil, ese número de colisiones resulta equiparable al de granos de arena de playa que caben en una piscina olímpica. En esta analogía, la cantidad de partículas de Higgs observadas apenas equivaldría a una diminuta pizca de esa arena.

El rendimiento del acelerador ha ido mejorando con el tiempo por encima de las expectativas iniciales, llegándose a alcanzar una intensidad de 500 millones de colisiones de protones por segundo. Cada una de ellas se registra como una sucesión de impulsos eléctricos en algunos de los casi 100 millones de sensores del detector: el equivalente a una fotografía tomada por una gigantesca cámara digital de 20 metros y 10.000 toneladas de peso. Cada segundo, los detectores toman millones de esas «fotografías», con una resolución espacial similar al diámetro de un cabello humano.

Un sistema electrónico ultrarrápido analiza y descarta en tiempo real el 99,999 por ciento de las colisiones registradas. En soporte magnético apenas se graban unos 500 choques por segundo, aquellos considerados más interesantes, para su posterior análisis. Aun así, el volumen de datos generados durante un año adquiere proporciones gigantescas. Cada colisión registrada ocupa en torno a un megaocteto (1 octeto = 1 *byte*), por lo que la cantidad de datos acumulados cada año asciende a varios petaoctetos (millones de gigaoctetos).

UNA NUEVA FORMA DE COMPUTACIÓN

En 1999 se comenzó a trabajar en el diseño de un sistema informático que permitiese almacenar y analizar el enorme volumen de datos que generaría el LHC. Enseguida se hizo evidente que la capacidad requerida superaría con creces la que el CERN podría financiar y albergar en su centro de cálculo, que hasta entonces siempre había acogido los ordenadores necesarios para procesar y analizar los datos de todos los experimentos del laboratorio. O se encontraba una solución o los investigadores quedarían literalmente sepultados en montañas de datos que nunca podrían procesar.

Debido en parte a su enorme complejidad y elevado coste, los experimentos del LHC se habían constituido como grandes colaboraciones internacionales, con la participación de grupos de investigación de decenas de países. Muchos de ellos disponían de potentes centros de cálculo. Existía, por tanto, una posible solución para gestionar la avalancha que se avecinaba: conectar todos esos centros en distintos países y, de alguna forma, aprovechar su potencia sumada. A finales de los años noventa el desarrollo de Internet se encontraba en pleno apogeo. Era la época de lo que poco después daría en llamarse la «burbuja puntocom». Tras varios años en los que la capacidad de Internet había crecido de forma exponencial —con la disminución de costes asociada—, la posibilidad de conectar centros de cálculo en distintos países se antojaba factible.

En 1999, Ian Foster y Carl Kesselman, investigadores del Laboratorio Nacional Argonne de EE.UU. y de la Universidad de California del Sur, respectivamente, publicaron un libro titulado *The grid: Blueprint for a new computing infrastructure*. En él reconocían el crecimiento exponencial de la conectividad mundial y pronosticaban las enormes posibilidades que ello brindaba para construir lo que, metafóricamente, se asociaba a un «superordenador distribuido». Para numerosos expertos, la publicación de esa obra supuso el nacimiento de una nueva tecnología: la computación *grid*.

La técnica de computación grid puede definirse como una federación de recursos informáticos (ordenadores, discos duros, redes de comunicaciones, etcétera) que, dispersos por todo el mundo, se usan de forma coordinada para resolver un problema. El término proviene de la palabra empleada en inglés para referirse a la red eléctrica (*power grid*), ya que pretende transmitir la idea de que el acceso a los recursos de cálculo y almacenamiento se asemeja a la manera en que disponemos de electricidad mediante un enchufe, sin preocuparnos de dónde viene ni cómo llega hasta nosotros.

Ya en 1999, los físicos sabían que el LHC generaría muchos más datos que los que el CERN podría albergar en su centro de cálculo

Hacia 1999, numerosos físicos e ingenieros llevaban casi diez años trabajando en el diseño de los detectores del LHC. Eran conscientes de que cada detector generaría al año varios petaoctetos, los cuales habría almacenar, procesar y distribuir para que miles de científicos de todo el mundo pudieran analizarlos. Muchos de los técnicos e informáticos que por entonces se encontraban preparando el sistema de procesamiento de datos leyeron el libro de Foster y Kesselman, y decidieron que ese era el camino.

JERARQUÍA DE RECURSOS

La WLCG, la infraestructura computacional del LHC, une centros de cálculo de todo el mundo a través de Internet mediante conexiones de gran ancho de banda, unas mil veces más rápidas que las que llevan Internet hasta nuestros hogares. Por esa red discurren a una velocidad vertiginosa los datos y los programas de análisis. La WLCG conecta recursos de computación como ordenadores personales, servidores y sistemas de almacenamiento de datos, al tiempo que suministra los mecanismos necesarios para acceder a ellos de manera transparente. Establece un entorno de computación colaborativo mundial que da servicio a unos 10.000 físicos, que, con independencia de su localización, pueden acceder a los datos en tiempo real. La WLCG está formada por más de 150 centros repartidos por todo el mundo. Actualmente dispone de una capacidad de almacenamiento de unos 400 petaoctetos (PB) y 225.000 procesadores, si bien dichos recursos crecen a

medida que el LHC va acumulando nuevos datos. Hoy por hoy, la WLCG constituye el mayor sistema de tecnología grid del mundo. Los centros de computación que lo integran se agrupan en dos redes principales, la Infraestructura Grid Europea (EGI, por sus siglas en inglés) y la Grid de Ciencia Abierta (OSG), en Estados Unidos. Cada uno de los países que integran la WLCG se compromete, a través de acuerdos formales, a aportar una fracción de sus recursos de computación.

La organización de tales recursos se basa en una jerarquía de centros organizados en varios estratos, o *tiers*. En el centro Tier-0, situado en el CERN, los datos en bruto de los detectores se almacenan en cinta magnética para su custodia a largo plazo y se copian en disco magnético para su inmediato procesado y clasificación. El Tier-0 dispone de 30.000 procesadores y cuenta con una capacidad de almacenamiento de 130 PB.

Desde allí, los datos se redistribuyen hacia otros 11 grandes centros de computación repartidos por todo el mundo, denominados Tier-1. El Tier-0 se conecta a ellos a través de una red óptica de comunicaciones privada dotada de un gran ancho de banda, del orden de 10 gigabits por segundo. Los Tier-1, con un total de 70.000 procesadores y una capacidad de almacenamiento de 170 PB, se encargan de guardar en cinta una segunda copia de los datos, seleccionarlos, reprocesarlos y distribuirlos hacia otros centros de computación situados en universidades y laboratorios, los Tier-2.

Unos 140 en número, los centros Tier-2 acogen del orden de 125.000 procesadores. En ellos se lleva a cabo el análisis de los datos y la producción de colisiones simuladas por ordenador. El espacio en disco de los centros Tier-2, unos 100 PB, se utiliza a modo de caché volátil de datos (una copia temporal de acceso rápido). Se borran los datos obsoletos o poco usados y se reemplazan por otros reprocesados o por aquellos a los que debe accederse con frecuencia.

Por último, los centros Tier-3 se encuentran situados en diversos centros de investigación. Aportan recursos a la comunidad científica local, sin un acuerdo formal para suministrar servicios a la organización en su conjunto.

España aporta el 5 por ciento de los recursos de la WLCG. Entre ellos, uno de los centros Tier-1: el Puerto de Información Científica (PIC). Situado en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona, es mantenido y operado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y el Instituto de Física de Altas Energías (IFAE). España dispone asimismo de centros Tier-2 en el CIEMAT (Madrid), la Universidad Autónoma de Madrid, el IFAE (Barcelona), la Universidad de Barcelona, el Instituto de Física Corpuscular (Valencia), el Instituto de Física de Cantabria y la Universidad de Santiago de Compostela. Existen además centros Tier-3 en la Universidad de Oviedo y en la Universidad Autónoma de Madrid.

A medida que ha ido aumentando la fiabilidad de los centros y la capacidad de las redes de comunicaciones que los conectan, la organización de los recursos ha evolucionado hacia una estructura menos jerarquizada. En ella, los centros Tier-1 y Tier-2 comparten funcionalidades y se transfieren datos a gran velocidad. Para ello se utilizan las redes de comunicación académicas nacionales, con un ancho de banda de varios gigabits por segundo.

La dispersión geográfica que caracteriza a la WLCG reporta importantes ventajas. Gracias a ella, se elimina el riesgo de que una avería en uno de los puntos de la red provoque un fallo generalizado en todo el sistema. La existencia de centros de computación en distintas franjas horarias faculta la monitorización permanente del sistema, así como la disponibilidad de soporte técnico durante las 24 horas del día. La posibilidad de acceder a los datos con independencia de la localización permite que los investigadores puedan permanecer en sus países de origen. Y la gestión independiente de los recursos fomenta la creatividad y la aparición de nuevas maneras de enfocar la computación y el análisis de datos.

Un sistema tan dinámico y flexible puede reconfigurarse con facilidad ante nuevos retos, lo cual permite su evolución a lo largo de la vida útil de LHC, así como la ampliación de recursos a medida que se acumulan más datos. Al mismo tiempo, la comunidad científica puede aprovechar las nuevas tecnologías que surjan a lo largo del proceso a fin de mejorar la eficiencia energética, reducir costes e incrementar la facilidad de uso de los recursos de computación.

Hoy, la WLCG ejecuta del orden de un millón de trabajos al día, pertenecientes a varios miles de usuarios. Los 225.000 procesadores integrados en la WLCG se mantienen ocupados en todo momento. Los centros Tier-2 aportan más de la mitad del tiempo de CPU utilizado por los experimentos; el CERN suministra en torno al 15 por ciento. Cientos de petaoctetos se transmiten anualmente por el sistema, llegándose a registrar promedios mensuales de más de 10 gigaoctetos por segundo, el equivalente a dos DVD llenos de datos por segundo.

ARQUITECTURA

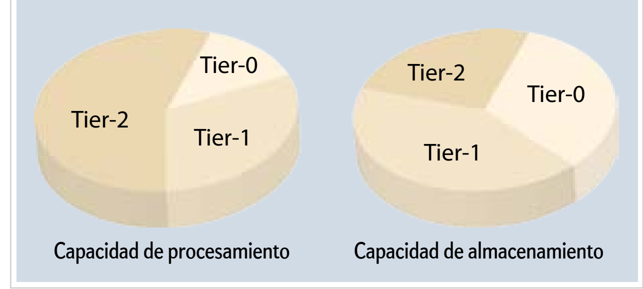
La computación grid se basa en una disponibilidad global de los recursos de computación y en un acceso rápido y transparente sin importar la localización del usuario. Siguiendo con la ana-

RECURSOS

La WLCG en números

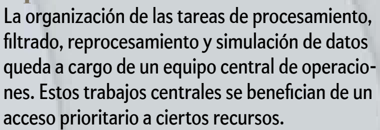
Para hallar el bosón de Higgs fue necesario almacenar, procesar y analizar decenas de petaoctetos de datos. Estas son las cifras de la infraestructura computacional que lo hizo posible, la Red Mundial de Computación para el LHC (WLCG).

- Unos **150 centros** de computación interconectados en todo el mundo: el Tier-0 del CERN, 11 centros Tier-1 y unos 140 centros Tier-2.
- El CERN y los centros Tier-1 se comunican mediante líneas de fibra óptica de **10 gigabits por segundo**.
- El conjunto suma **225.000 procesadores.**
- La capacidad total de almacenamiento en disco y cinta magnética asciende a **400 petaoctetos.**
- En cada instante se ejecutan, de media, más de **200.000 tareas.**
- Cada mes se finalizan unos **30 millones de trabajos**.
- La WLCG da servicio a unos **10.000 físicos.**



El procesamiento de la información en el LHC

Desde que los detectores del LHC registran las colisiones entre protones hasta que los físicos las analizan, los datos siguen un tortuoso viaje de selección, almacenamiento, transmisión y transformación. La WLCG permite almacenar y procesar una cantidad de información que ningún superordenador podría manejar por sí solo. Está formada por unos 150 centros de computación repartidos por todo el mundo, estructurados en tres capas principales: el centro Tier-0, en el CERN, los centros Tier-1 (11 en total) y los Tier-2 (unos 140).



Operaciones centralizadas
La organización de las tareas de procesamiento, filtrado, reprocesamiento y simulación de datos queda a cargo de un equipo central de operaciones. Estos trabajos centrales se benefician de un acceso prioritario a ciertos recursos.

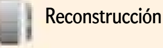
Al recibir las solicitudes de los usuarios, el sistema localiza los recursos disponibles y los asigna de manera equilibrada. Después, devuelve el resultado al investigador.

❶ Cada colisión debe examinarse en menos de tres millonésimas de segundo. Un sistema electrónico ultrarrápido analiza en tiempo real las lecturas de los sensores y selecciona, en promedio, una de cada cien mil.

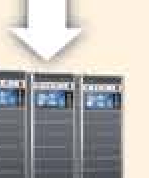
❷ Los datos en bruto de las colisiones seleccionadas se almacenan, procesan y clasifican en el centro Tier-0. Un código informático identifica las partículas producidas en las colisiones y reconstruye su trayectoria, energía y carga eléctrica.

TIER-0


Almacenamiento (archivado y 1.ª copia)


Reconstrucción

Calibración



❸ El alineamiento de los detectores o la calibración de los sensores afectan a la reconstrucción, por lo que estos parámetros se recalculan continuamente a fin de que reflejen en cada momento el estado real del detector.

❹ Los datos reconstruidos se distribuyen hacia los centros Tier-1. Una segunda selección filtra las colisiones que se consideran más interesantes. Si es necesario, los datos se reprocesan cuando se mejoran las técnicas de reconstrucción o se refina la calibración de los detectores.

TIER-1

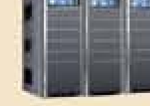

Almacenamiento (2.ª copia)

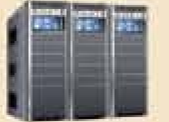

Filtrado


Reprocesado



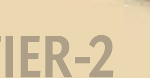








TIER-2




Caché volátil



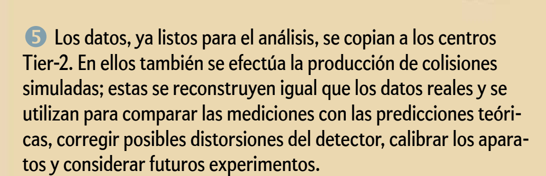

Simulación


Análisis



Análisis de datos
Cada miembro de los experimentos del LHC dispone de un certificado digital que le permite acceder a la WLCG y solicitar los recursos necesarios, como datos, programas informáticos, tiempo de cálculo o capacidad de almacenamiento.

Tras obtener el resultado, los usuarios proceden a su elaboración final, la cual suele implicar análisis estadísticos y representaciones gráficas.



❺ Los datos, ya listos para el análisis, se copian a los centros Tier-2. En ellos también se efectúa la producción de colisiones simuladas; estas se reconstruyen igual que los datos reales y se utilizan para comparar las mediciones con las predicciones teóricas, corregir posibles distorsiones del detector, calibrar los aparatos y considerar futuros experimentos.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; CERN/CMS (detector); THINKSTOCK (iconos)

logía entre la tecnología grid y la red eléctrica, también la primera puede considerarse ubicua, ya que resulta accesible desde cualquier plataforma con conexión a Internet. Provee asimismo un servicio a toda una colectividad, pues cualquier individuo puede solicitar capacidad de cálculo o almacenamiento, obtenerla y consumirla. Dado que tales recursos son compartidos por multitud de usuarios, resulta esencial emplearlos de manera eficiente y equilibrada.

Uno de los mayores retos técnicos a los que se enfrenta el desarrollo de la computación grid radica en la seguridad. A fin de garantizarla, en la WLCG ha sido necesario establecer protocolos de acceso, identificación (quién accede a cada recurso) y autorización (qué operaciones están permitidas para cada usuario en cada recurso). Por otro lado, la adopción de estándares comunes y abiertos hace posible que cualquiera pueda contribuir de manera constructiva a su perfeccionamiento, al tiempo que anima a la industria a invertir en el desarrollo de infraestructuras y servicios grid comerciales.

La computación grid se edifica en torno a una arquitectura que cuenta con varios niveles, cada uno de los cuales posee una función específica. El nivel inferior se corresponde con la red de comunicaciones que interconecta los recursos. La WLCG utiliza redes de Internet ultrarrápidas, de alta capacidad y baja latencia (poca demora), como GEANT, que interconecta las redes académicas europeas a través de fibras ópticas de 10 gigabits por segundo.

Por encima de la red de comunicaciones se sitúan los recursos de computación, como ordenadores y sistemas de almacenamiento. Estos constituyen la infraestructura física (*hardware*), a menudo llamada *fabric*, o «tejido», del sistema. El siguiente es el nivel intermedio entre los componentes físicos y las aplicaciones, el llamado *middleware*. Puede entenderse como el «cerebro» de la red, ya que comprende los servicios informáticos que permiten integrar los distintos recursos. Su función consiste en aunar y organizar todos esos componentes mediante programas que automatizan la interacción entre las máquinas, a fin de crear un sistema de apariencia unificada.

En el último lugar se encuentran las aplicaciones. Estas conforman el nivel que el usuario ve y aquel con el que interacciona. En él se incluyen una serie de servicios que administran los recursos, como el sistema de gestión de procesos (WMS, por sus siglas en inglés) y el de gestión de los datos (DMS). El WMS se encarga de recibir las peticiones de procesamiento de los usuarios, enviarlas a los recursos más adecuados, hacer un seguimiento de los trabajos y devolver el resultado al investigador. El DMS cataloga los datos disponibles, gestiona su replicado, transferencia y borrado, y permite que las tareas de procesamiento accedan a los datos.

TAREAS INDEPENDIENTES

Los datos del LHC corresponden a billones de colisiones de protones independientes entre sí. Por tanto, resulta posible subdividir su procesamiento en numerosas tareas que pueden ejecutarse en paralelo de manera desacoplada. Este tipo de análisis se conoce como computación de alto rendimiento (*high throughput computing*, HTC). Debe diferenciarse de la computación de altas prestaciones (*high performance computing*, HPC), o supercomputación, la cual se refiere a la ejecución de procesos que necesitan comunicarse entre sí de manera muy rápida y sincronizada para resolver un problema complejo. Esta última suele involucrar un superordenador monolítico compuesto por multitud de procesadores idénticos.

En la computación grid las tareas se distribuyen entre los diferentes procesadores del sistema, que no tienen por qué ser iguales ni encontrarse en un mismo centro de cálculo. La comunicación entre nodos tampoco es necesaria, por lo que un retraso en la ejecución de una de las tareas no afecta a las demás. A medida que unas labores finalizan, el sistema de gestión de procesos va introduciendo otras nuevas, gracias a lo cual pueden completarse miles de tareas en un corto período de tiempo.

Así pues, los superordenadores y la tecnología grid constituyen herramientas distintas que sirven a fines diferentes. Los primeros son máquinas enormes en las que miles de procesadores se coordinan para solucionar un gran problema. En la computación grid, miles de procesadores trabajan por separado para resolver un gran número de problemas independientes y de menor entidad. Como consecuencia, su uso se encuentra limitado a aquellos casos en los que la tarea global puede subdividirse en pequeñas partes. Pero, por otro lado, la tecnología grid presenta una enorme ventaja, ya que su funcionamiento se basa en componentes informáticos estándar, los mismos que usan la mayoría de las empresas e incluso hogares en todo el mundo. Ello reduce enormemente los costes asociados, gracias a las economías de escala típicas de los mercados de consumo masivo.

La WLCG gestiona unos 400 PB de datos, una cantidad que ningún superordenador actual podría almacenar. Hoy por hoy, constituye la única infraestructura capaz de gestionar semejante volumen de información. Es cierto que existen algunos centros de cálculo en los que seguramente sí «cabrían» todos los ordenadores de la WLCG. Las grandes corporaciones tecnológicas, como Amazon, Google, Microsoft, Facebook o Apple, cuentan

De la WWW a la WLCG



El primer servidor web de la historia, en el CERN.

En marzo de 1989, Tim Berners-Lee, un joven informático del CERN, propuso a sus jefes desarrollar un sistema basado en hipertexto para que los científicos pudiesen compartir información. Acababa de inventar la World Wide Web.

En 1990 se lanzó al mercado la versión 3.0 del sistema operativo Windows. Aquello marcó el inicio de una época de popularización del ordenador personal. De repente, millones de personas podían crear contenido digital desde su casa.

En agosto de 1991 apareció la primera página web en Internet: **http://info.cern.ch**



Navegador web en modo de texto creado en el CERN en 1992.

En 1993 solo había unos 50 sitios web y alrededor de una docena de usuarios del navegador desarrollado por Berners-Lee. Marc Andreessen y Eric Bina, del centro de supercomputación NCSA, crearon Mosaic, el primer navegador que integraba texto y gráficos y que podía funcionar en la mayoría de los sistemas operativos, incluido Windows.

En 1994, Andreessen y Bina fundaron la compañía Netscape para explotar el potencial comercial de su navegador.

En 1995 Netscape salió a bolsa. Ese momento es considerado por muchos como el inicio de la burbuja de las compañías puntocom.

1989 1990 1991 1993 1994 1995

con instalaciones que alojan decenas de miles de ordenadores, o quizá cientos de miles (las compañías suelen mantener en secreto estos detalles). Sin embargo, recurrir a tales centros no resultaría factible por varios motivos. Uno de ellos es el carácter internacional de las colaboraciones del LHC, en las que cada país aporta al presupuesto global de la organización la fracción que le corresponde mediante sus planes nacionales de investigación. A la hora de financiar la infraestructura informática, la alternativa más natural —y la más sencilla— pasa por invertir en los grandes centros informáticos que ya existen en cada país. La facilidad para compartir datos que brinda la WLCG reviste, en este sentido, una importancia fundamental.

Existen otras federaciones de recursos informáticos que también se basan en sumar la potencia de cientos de miles de ordenadores, pero cuyos medios no proceden de los centros de investigación, sino de ordenadores domésticos. Uno de los proyectos que más popularizó esta idea fue SETI@home, lanzado en 1999 para analizar señales de radiotelescopios en busca de posibles signos de vida extraterrestre inteligente. Para ello, SETI@home utiliza la potencia de cálculo de cientos de miles de ordenadores caseros de todo el mundo, en los que sus propietarios han instalado de manera voluntaria un pequeño programa que permite al proyecto utilizar sus máquinas cuando se encuentran ociosas. SETI@home dispone actualmente de una potencia de unos 600 teraflops (600 billones de operaciones por segundo), lo que lo situaría cerca de cuadragésima posición en la lista de los 500 superordenadores más potentes del mundo (el lector puede consultarla en www.top500.org).

DE LA RED A LA NUBE

Desde el momento en que comenzó a hablarse de la computación grid, una de las características más buscadas fue la facilidad de uso. El sistema tenía que esconder su complejidad real y dar a los usuarios la sensación de que estaban manejando un gran ordenador virtual. Durante los primeros años, esa fue la asignatura pendiente de la WLCG. Su prioridad era transferir petaoctetos de datos y gestionar a la vez decenas de miles de tareas. Sin embargo, las primeras versiones que lo lograron resultaban muy difíciles de manejar, por lo que su operación necesitaba un equipo de expertos muy cualificados.

Durante aquellos años fue interesante ver cómo las grandes empresas informáticas mantuvieron siempre el enlace con los proyectos grid científicos. Sin embargo, en la mayoría de los casos no llegaron a apostar por técnicas semejantes, debido en gran parte a la dificultad de su manejo, lo que sin duda obstaculizaba su comercialización.

Fue hacia 2006 cuando algunas cosas empezaron a cambiar. Desde hacía unos años existían ciertos programas, llamados «máquinas virtuales», que emulaban el comportamiento del *hardware* de un ordenador. Ello condujo a Amazon a alquilar la potencia de cálculo de sus ordenadores cuando estos se encontraban desocupados. En 2006, la compañía lanzó el servicio Amazon Web Services, que ofrecía a cualquier persona con una tarjeta de crédito la posibilidad de ejecutar máquinas virtuales en sus ordenadores. La empresa dio así con un nuevo modelo de negocio basado en muchas de las ideas de la computación grid, pero que añadía una pieza fundamental: la facilidad de uso de las máquinas virtuales. Ello supuso el pistoletazo de salida en una carrera a la que, ahora sí, todas las grandes empresas informáticas se apuntaron de inmediato. Se acuñó el término «computación en la nube» (*cloud computing*) y comenzaron a surgir nuevos servicios por todas partes.

Mientras tanto, la WLCG continuó evolucionando. Gracias a los desarrollos de programación que surgieron desde el entorno científico, se logró esconder gran parte de la complejidad del sistema. Por fin, los miles de investigadores que debían analizar los datos del LHC podían hacerlo sin necesidad de convertirse en expertos informáticos. A diferencia de lo que ocurría en 2002, cuando la WLCG se encontraba en sus inicios, hoy existen varias empresas que venden «horas de cálculo» o «teraoctetos de disco al mes». Los científicos han considerado la posibilidad de usar estos servicios comerciales en la nube para analizar los datos del LHC; pero, al menos por ahora, implicaría un coste prohibitivo. En cualquier caso, el éxito de este modelo de negocio y su creciente adopción en diferentes sectores de la economía constituye un hecho que la comunidad del LHC no puede ignorar. Parece inevitable que, en los próximos años, ambas tecnologías acaben convergiendo hacia un sistema que haga posible compartir recursos y gestionar grandes cantidades de datos. Es decir, una técnica similar a la computación grid, pero que a la vez se beneficie de la facilidad de uso de los servicios en la nube comerciales.

LA CIENCIA DE LOS PETAOCTETOS

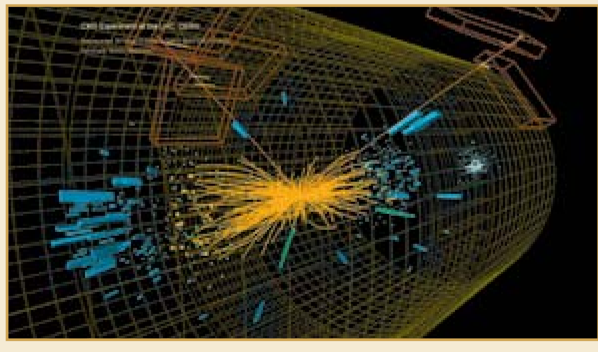
Los experimentos del LHC se encontraban entre los primeros que pusieron a los científicos ante el reto de manejar petaoctetos de datos. Durante la primera década de este siglo, sus investigadores desempeñaron un papel fundamental en el desarrollo de las tecnologías grid. Pero dicha infraestructura se diseñó desde sus comienzos con vocación de erigirse como una plataforma multidisciplinar, que pudiera explotarse no solo desde el ámbito de la física de partículas, sino desde cualquier



Entre 1995 y 2000 se crearon cientos de empresas que basaban su actividad en Internet. Aunque en la mayoría de los casos el modelo de negocio no estaba claro, su cotización en Bolsa se disparó. Las empresas de telecomunicaciones desplegaron miles de kilómetros de fibra óptica por todo el mundo.

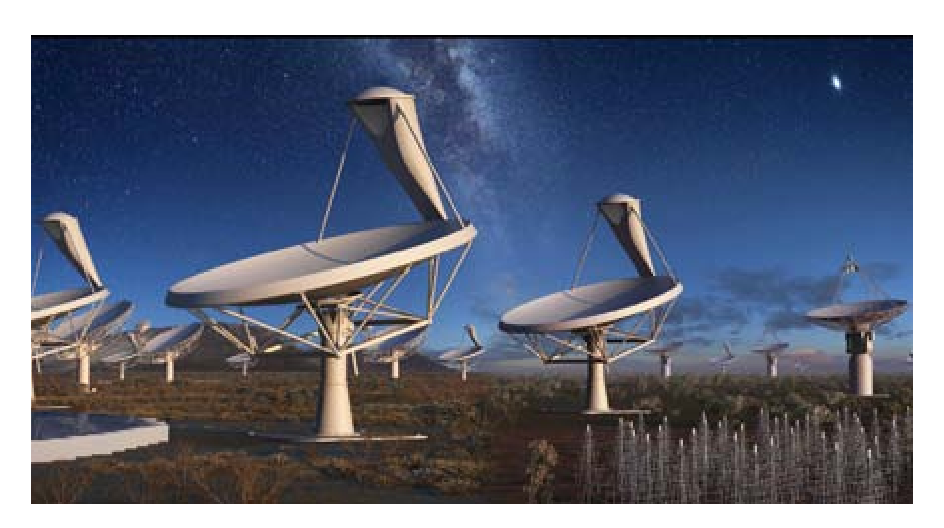
En 2001 explotó la burbuja puntocom. Como resultado colateral, el mundo quedó hiperconectado: el despliegue de la computación en grid a gran escala ya era posible.

En 2002, ante la avalancha de datos que se sabía que generaría el LHC, comenzó a desarrollarse la WLCG. Diez años después, varias disciplinas científicas se benefician de una nueva forma de computación capaz de manejar petaoctetos de datos.



Reconstrucción de un suceso registrado en el detector CMS en mayo de 2011. Sus características indican que podría corresponder a la desintegración de un bosón de Higgs.

2000 | 2001 | 2002



DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS A LA ASTRONOMÍA: Las nuevas técnicas de procesamiento masivo de datos cambiarán la manera de hacer ciencia. La futura batería de radiotelescopios SKA (*recreación artística*), cuya construcción en Sudáfrica y Australia está planeada para la década de 2020, generará cada día más de un exaocteto de datos: más que todo el tráfico mundial de Internet actual.

otra rama de la ciencia con retos similares en lo tocante a la gestión de datos.

Cada vez más disciplinas científicas se enfrentan a la necesidad de analizar un volumen de información similar al que se encontraron los físicos de partículas tras la llegada del LHC. Ello se debe a que, durante las últimas dos décadas, una gran cantidad de instrumentos han pasado de ser analógicos a digitales, al tiempo que su precisión ha aumentado de manera exponencial. Los ejemplos que ilustran esta transición abundan, pero podemos fijarnos en tres campos paradigmáticos: la medicina, la genómica y la astrofísica.

El uso y la calidad de los sistemas de diagnóstico por imagen médica no ha dejado de crecer durante los últimos años. Hoy en día, un hospital de tamaño medio puede generar decenas de teraoctetos al año en forma de imágenes médicas. En la mayoría de los casos, estas han de guardarse durante décadas, no solo como parte del historial de los pacientes, sino también para incorporarlas a estudios de investigación. El sistema hospitalario de un país como España puede estar generando en la actualidad varios petaoctetos de datos al año. Los retos técnicos que implica gestionar toda esa información coinciden, en numerosos aspectos, con los que han tenido que sortear los científicos del LHC. No en vano, las tecnologías grid ya se han usado con éxito en algunos hospitales para implementar sistemas de archivo remoto o intercambio de datos entre centros. Hace poco, el PIC de Barcelona colaboró con la unidad de neurorradiología del Hospital de Sant Pau, sito en la misma ciudad, en el desarrollo de sistemas orientados a aumentar la eficiencia del almacenamiento y el procesado de datos.

Otro ejemplo aún más extremo lo hallamos en la genómica. Aunque el Proyecto Genoma Humano se completó en 2003, hoy se sigue investigando el papel de los genes y las proteínas como constituyentes básicos de la materia viva. Secuenciar el primer genoma humano llevó trece años y costó miles de millones de euros; hoy, el genoma de cualquiera de nosotros puede secuenciarse en unos días por pocos miles de euros. La técnica se aplica en la actualidad de manera rutinaria, lo que se traduce en ingentes cantidades de datos. La secuenciación completa del genoma de un individuo puede llegar a ocupar cerca de un teraocteto, pero ya hay estudios en marcha para analizar y comparar el genoma de miles de personas. Tarde o temprano, también los genetistas habrán de hacer frente a la gestión de petaoctetos de datos.

Por último, otra disciplina en la que la avalancha de datos es ya un hecho es la astrofísica. El motivo principal resulta muy fácil de entender, pues es el mismo por el que muchos de nosotros hemos cambiado de cámara de fotos varias veces a lo largo de los últimos años: por más que nos esforcemos en adquirir el modelo más reciente, sabemos que, en poco tiempo, incluso nuestro teléfono móvil incorporará una cámara con más megapíxeles que la última maravilla que acabamos de adquirir. La ley de Moore se aplica también a los sensores CCD que las cámaras digitales emplean para captar las imágenes, por lo que el número de píxeles por pulgada aumenta cada año a un ritmo exponencial. Los telescopios con los que los astrofísicos exploran el cielo para desentrañar los misterios del universo utilizan cámaras digitales y, por tanto, experimentan la misma evolución.

Durante sus veinte años de operaciones, el telescopio espacial Hubble acumuló 45 TB de datos. Hoy se están diseñando telescopios que, dentro de unos años, generarán la misma cantidad de información cada noche. Semejantes volúmenes de datos no tienen precedentes en astronomía. En algunos casos, los requisitos de almacenamiento y velocidad de acceso superarán a los que necesitan los físicos de partículas del LHC. Por ello, los investigadores de ambas disciplinas ya han comenzado a trabajar juntos, para aprender de la experiencia y mejorar los sistemas que, en el futuro, habrán de cribar cantidades de datos cada vez mayores en menos tiempo.

Al suministrar la tecnología necesaria para analizar cuestiones hasta hace poco inabordables, la computación grid está impulsando en todo el mundo nuevas formas de hacer ciencia. Los expertos de varias disciplinas pueden ahora compartir datos, espacio de almacenamiento, capacidad de cálculo y resultados. Gracias a ello, podrán plantearse cuestiones científicas cada vez más complejas.

PARA SABER MÁS

The grid: Blueprint for a new computing infraestructure. Ian Foster y Carl Kesselman. Morgan Kaufmann, 2003 (2.ª edición).
The Worldwide LHC Computing Grid. Página oficial: **wlcg.web.cern.ch/**
Grid Café. Página web para explorar la computación grid de manera simple y estimulante (en inglés y en español): **www.gridcafe.org/ES**

EN NUESTRO ARCHIVO

La malla: computación sin límites. Ian Foster en *IyC*, junio de 2003.
El Gran Colisionador de Hadrones. Graham P. Collins en *IyC*, abril de 2008.
Centro español Tier-1 para los datos del LHC. Manuel Delfino en *IyC*, abril de 2008.
La búsqueda del bosón de Higgs. Martine Bosman y Teresa Rodrigo en *IyC*, septiembre de 2012.



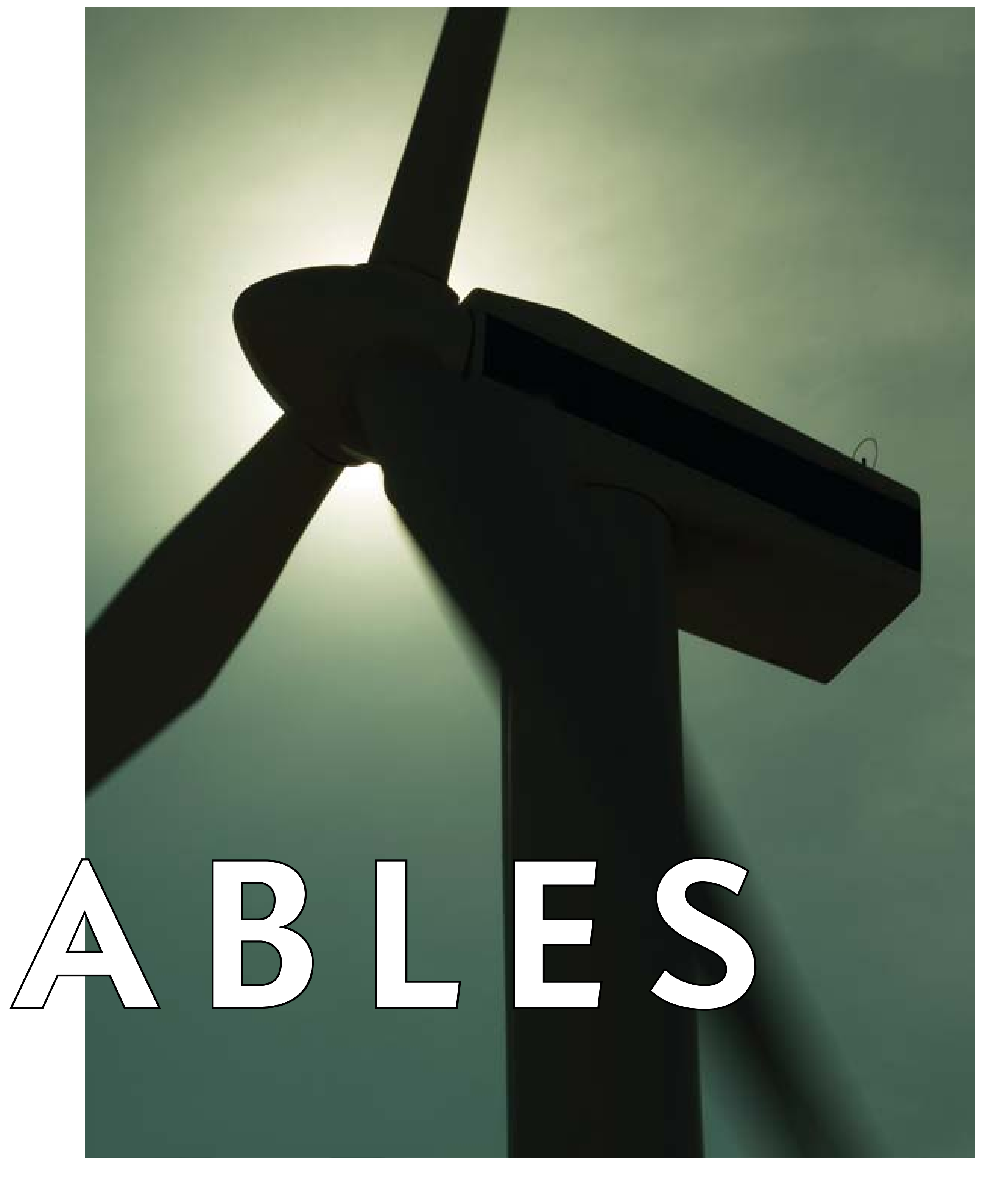
ENERGÍA

EL LENTO DE LAS RENOV



No hay ninguna razón para esperar una transición rápida hacia un

ASCENSO



ABLES

modelo energético basado en alternativas a los combustibles fósiles

Vaclav Smil

Vaclav Smil es profesor emérito de la Universidad de Manitoba y autor de más de treinta libros sobre energía y medioambiente.



LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA PODRÍAN CONQUISTAR EL MUNDO EN UN SOLO ASALTO.

Así pensaba en 1976 Amory Lovins, conocido defensor de las energías alternativas. Para el año 2000, auguraba Lovins, el 33 por ciento de la energía de EE.UU. procedería de una multitud de pequeñas fuentes no perecederas y descentralizadas. Decenios más tarde, en julio de 2008, Al Gore proclamaba que refundar el suministro eléctrico de EE.UU. en diez años era «factible, asequible y transformativo». Poco después, Mark Jacobson y Mark Delucchi proponían desde estas páginas un plan para reconvertir el sistema energético mundial en solo dos décadas [*véase* «Energía sostenible: Objetivo 2030», por M. Jacobson y M. Delucchi; Investigación y Ciencia, enero de 2010].

EN SÍNTESIS

Cada una de las grandes transiciones energéticas mundiales —de la madera al carbón y de este al petróleo— ha necesitado entre 50 y 60 años. Se prevé que la actual mudanza hacia el gas natural también se demore varios decenios.

Nada indica que la transición a las renovables vaya a ser más rápida. Las alternativas «antiguas», como la hidroeléctrica, ya no dan más de sí. Y la eólica, la solar o los biocombustibles apenas cubren un porcentaje ínfimo de la demanda.

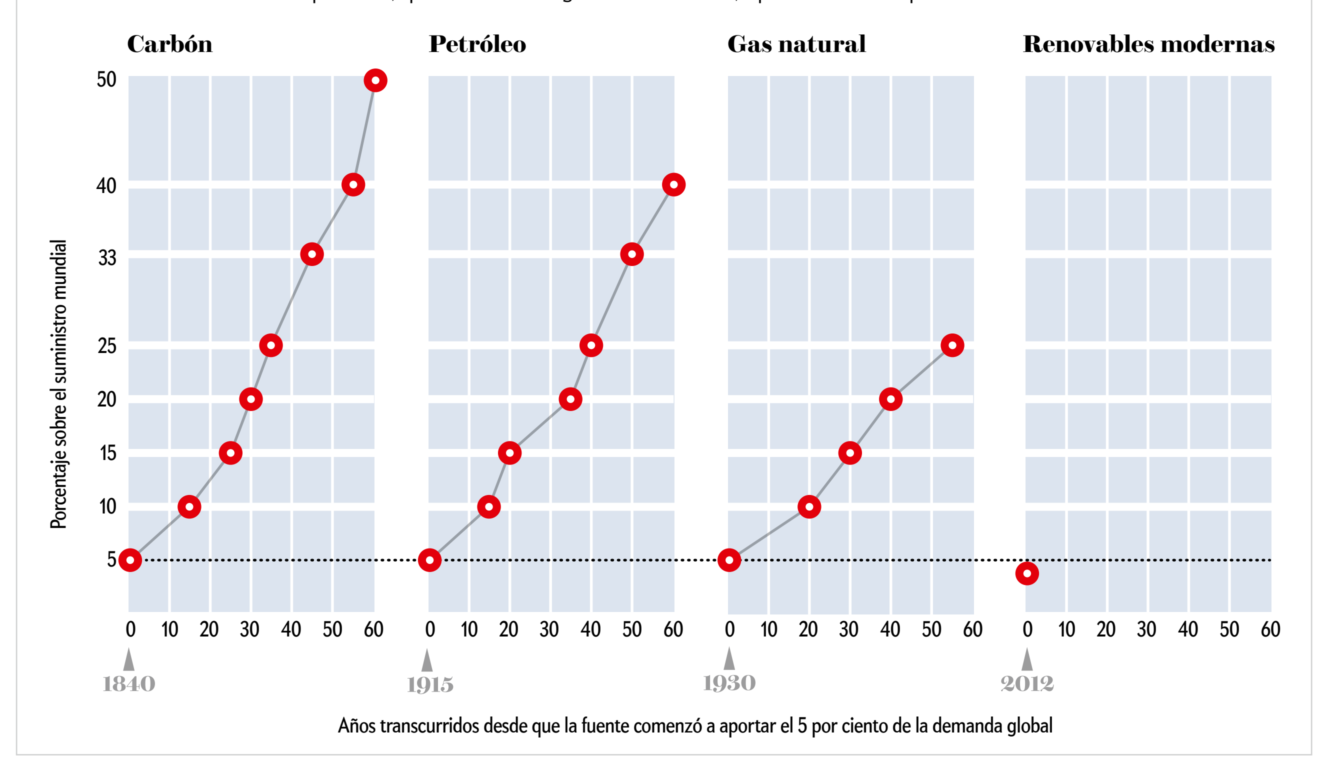
Con todo, algunas políticas podrían facilitar el cambio. Entre ellas, no subvencionar técnicas cortoplacistas, asegurar que los precios reflejen los costes ambientales y sanitarios, y mejorar la eficiencia energética.

PÁGINAS ANTERIORES: OLI KELLETT, GETTY IMAGES (*paneles solares*); MARTIN SOEBY, GALLERY STOCK (*turbina*)

TRANSICIONES PASADAS

Abrirse hueco en el mercado energético

En los últimos dos siglos, cada fuente energética que ha alcanzado una posición de dominio ha necesitado entre 50 y 60 años para lograrlo. El carbón, que desplazó a la madera, tardó desde 1840 hasta 1900 en pasar del 5 al 50 por ciento del suministro mundial. El petróleo, que aún no ha llegado al 50 por ciento, ascendió a un ritmo casi idéntico. El gas natural, probable sucesor del petróleo, procede aún con mayor lentitud. Hoy, las energías renovables «modernas» (eólica, solar, geotérmica y biocombustibles) apenas dan cuenta de un 3,4 por ciento de la producción mundial.



FUENTES: *BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY*; COMISIÓN ESTADÍSTICA DE LAS NACIONES UNIDAS

Pero, entre 1990 y 2012, la fracción de la energía mundial obtenida a partir de combustibles fósiles apenas descendió del 88 al 87 por ciento. En 2011, las renovables contribuían con menos del 10 por ciento al abastecimiento de EE.UU., la mayoría mediante técnicas «viejas», como la hidroeléctrica o la quema de restos madereros. Tras más de 20 años de generosas subvenciones, las nuevas fuentes, como la eólica y la solar, y los biocombustibles modernos, como el etanol de maíz, solo cubren el 3,35 por ciento del suministro energético del país.

Esa lentitud no debería sorprender a nadie. Tanto en EE.UU. como en el resto del mundo, cada vez que un combustible ha sido reemplazado por otro, el proceso ha durado entre 50 y 60 años. Así ocurrió con el paso de la madera al carbón y, más tarde, con el cambio del carbón al petróleo. EE.UU. está atravesando ahora su tercera gran transición energética: la del carbón y el petróleo hacia el gas natural. Entre 2001 y 2012, mientras el consumo de carbón cayó un 20 por ciento y el de crudo un 7 por ciento, el de gas natural creció un 14 por ciento. Pero, aunque el gas natural sea abundante, relativamente limpio y asequible, aún pasarán uno o dos decenios antes de que arrolle al carbón, un combustible que todavía genera más de un tercio de la electricidad de EE.UU.

Las renovables no están despegando más rápido que ninguna otra fuente energética, y no hay razones técnicas ni económicas para creer que vayan a hacerlo. En parte, porque la demanda global de energía no deja de crecer: al gas natural ya le costará seguir ese ritmo, y las renovables lo tendrán aún más difícil. Puede que en algunos países el cambio suceda a mayor velocidad, pero, desde una perspectiva mundial, la transición a las renovables será lenta; sobre todo, mientras dure la actual mudanza al gas natural. Por supuesto, siempre podrá surgir una técnica rompedora o una política revolucionaria, pero cualquier cambio de modelo llevará largo tiempo.

MADERA, CARBÓN Y PETRÓLEO

La gran esperanza actual en una transición rápida hacia las renovables no es más que producto del voluntarismo y de una interpretación errónea de la historia reciente. Existe la creencia generalizada de que, en el siglo XIX, el consumo energético mundial estuvo dominado por el carbón; en el XX, por el petróleo, y que nuestro siglo pertenecerá a las fuentes alternativas. Las dos primeras impresiones son falsas; la última, discutible.

Aun con el auge de la maquinaria industrial, el siglo XIX no funcionó con carbón, sino con madera, carbón vegetal y residuos de cosecha (en su mayoría, paja de cereales). Estos generaron el 85 por ciento de la energía mundial, estimada en unos 2,4 yottajulios (YJ, 10^{24} julios). El carbón alcanzó el 5 por ciento de toda la energía procedente de combustibles hacia 1840. Pero, en 1900, apenas satisfacía la mitad de la demanda. Pasar del 5 al 50 por ciento le llevó entre 50 y 60 años. Varias estadísticas estadounidenses fiables apuntan a 1885 como el año en que la energía generada por combustibles fósiles (prin-

cipalmente carbón, algo de crudo y una pequeña cantidad de gas natural) superó a la procedente de madera y carbón vegetal. Ese vuelco ocurrió en 1875 en Francia y en 1901 en Japón, pero no llegó a la URSS hasta 1930, a China hasta 1965 y a la India hasta finales de los setenta.

Por otro lado, la principal fuente de energía en el siglo xx no fue el petróleo, sino el carbón. Los carbones bituminosos y los lignitos alcanzaron la mayor fracción del consumo mundial de combustibles, con un 55 por ciento durante la década de 1910. El crudo no superó al carbón hasta 1964. Pero, dado que el declive del carbón se vio acompañado de un incremento de la demanda energética global, en términos absolutos fue el carbón, y no el petróleo, el principal combustible del siglo xx. La contribución del primero se calcula en unos 5,3 YJ, frente a los 4 YJ del petróleo. Hasta hoy, solo dos grandes economías han completado la tercera transición de los combustibles fósiles: en la URSS, el consumo de gas natural superó al de crudo en 1984; en el Reino Unido, en 1999.

Para ver lo graduales y prolongadas que resultan las transiciones energéticas, merece la pena representar la evolución temporal de la fracción correspondiente a cada tipo de combustible. Para cada uno de ellos, la curva comienza cuando llega al 5 por ciento del suministro total (*véase el recuadro en la página anterior*). Las tres grandes transiciones que hemos mencionado presentan intrigantes similitudes. El carbón alcanzó el 5 por ciento del mercado global hacia 1840, el 10 por ciento en 1855, el 15 por ciento en 1865, el 20 por ciento en 1870, el 25 por ciento en 1875, el 33 por ciento en 1885, el 40 por ciento en 1895 y el 50 por ciento en 1900. La secuencia de años hasta cada hito fue 15-25-30-35-45-55-60. En cuanto a la transición al petróleo, iniciada en 1915 con una fracción del 5 por ciento, los intervalos fueron prácticamente idénticos.

El gas natural supuso el 5 por ciento del mercado global de combustibles en 1930. Después, alcanzó las mismas cuotas que el carbón y el petróleo en una secuencia de 20-30-40-55 años (aún debe llegar al 33 por ciento del suministro global). Al comparar los datos, vemos que tardó bastante más que los otros dos combustibles en llegar al 25 por ciento: unos 55 años, frente a los 35 del carbón y los 40 del petróleo.

Por supuesto, tres secuencias no bastan para predecir el ritmo de las transiciones futuras. Y si una verdadera revolución técnica lograse una energía nuclear asequible y segura, o si se desarrollasen medios eficientes para almacenar la producción eólica y solar, no cabe duda de que el cambio se precipitaría. Pero no dejan de resultar notorias las similitudes entre las tres transiciones energéticas que hemos vivido en dos siglos, sobre todo si tenemos en cuenta que cada combustible exigió sus propias técnicas de producción, canales de distribución y maquinaria. A escala mundial, la inversión e infraestructura necesarias para que una nueva fuente de energía alcance una fracción considerable del mercado requiere dos o tres generaciones: entre 50 y 75 años.

EL COMPLEJO CAMBIO A LAS RENOVABLES

Hasta ahora, las técnicas de producción alternativas han evolucionado con la misma lentitud. En 2011 supusieron el 9,39 por ciento de la energía generada en EE.UU.: 9,637 exajulios (EJ, 10^{18} julios), sobre un total de 102,7 EJ consumidos. Las fuentes renovables tradicionales suministraron el 6,01 por ciento: las centrales hidroeléctricas, el 3,25 por ciento; la madera (en su mayoría, residuos de explotaciones madereras), el 2,04 por ciento, y el resto fue de origen geotérmico y biomasa. Las fuentes alternativas «modernas» siguieron siendo insignificantes. Los biocombustibles líquidos aportaron el 2,0 por ciento; la energía eólica, el 1,19 por ciento, y la solar, el 0,16 por ciento. Esos 3,35 puntos porcentuales procedentes de las nuevas fuentes de energía representan una cifra importante. Prácticamente todo el crecimiento futuro en el suministro renovable de EE.UU. tendrá que provenir de ellas, ya que el potencial de crecimiento de las fuentes tradicionales, sobre todo la hidroeléctrica, es muy limitado.

Son varias las razones que dificultan la transición a las renovables. El primero es la escala. En 2012, el consumo mundial de energía procedente de combustibles fósiles ascendió a unos 450 EJ: veinte veces más que entre 1890 y 1900, cuando el carbón desplazaba a la madera. Solo esa cantidad de energía ya resulta sobrecogedora, sea cual sea la fuente.

Una transición gradual requerirá reducir el consumo energético. Cuanto más rápido crezca este, tanto más difícil resultará cubrir una fracción considerable

Otro factor reside en la naturaleza intermitente de las energías eólica y solar. Las sociedades modernas necesitan un suministro eléctrico fiable e ininterrumpido, con una demanda nocturna cada vez mayor para la climatización y las infraestructuras de las grandes urbes, desde vagones de metro hasta servidores de Internet. En EE.UU., las centrales de carbón y las nucleares se ocupan de suministrar la «carga base» (la parte producida sin interrupción durante las 24 horas). Las centrales hidroeléctricas y las de gas natural, que pueden encenderse y apagarse con rapidez, acostumbran a proveer la energía adicional necesaria para satisfacer los picos de demanda, cortos pero, a ciertas horas, muy superiores a la carga base.

Las energías eólica y solar pueden contribuir a la carga base, pero por sí solas no pueden cubrirla por completo: el viento no siempre sopla y el sol no siempre brilla, por lo que su suministro no es fiable. En países como Alemania, donde las renovables han crecido de manera sustancial, la eólica y la solar pueden sumar todo un abanico de porcentajes: desde una cantidad ínfima hasta casi la mitad de la demanda en las horas en que el viento sopla con fuerza y luce el sol. Pero semejantes fluctuaciones requieren el apoyo de otras centrales, por lo general de carbón o gas, o bien aumentar las importaciones de electricidad, lo cual puede causar graves trastornos en el flujo de electricidad de países vecinos.

Si las compañías eléctricas dispusieran de un procedimiento económico para almacenar los excedentes de energía solar y eólica generados durante los períodos de baja demanda, la expansión de las renovables procedería mucho más rápido. Por

desgracia, tras decenios de desarrollo solo se ha encontrado una buena solución a gran escala: bombear agua hasta un embalse elevado, para luego dejarla fluir y que accione un turbogenerador. Pero no hay muchos emplazamientos que ofrezcan los desniveles ni el espacio necesarios para aplicar la técnica; además, en ocasiones el proceso implica pérdidas netas de energía.

Otra alternativa consistiría en construir un vasto sistema de granjas eólicas y solares en un área muy extensa (del tamaño de un gran país o de medio continente) y conectarlas mediante líneas de transmisión. Una red así maximizaría la posibilidad de que siempre hubiese centrales suministrando energía a la red general. Hoy resulta técnicamente viable fabricar líneas de transmisión mejores y de mayor longitud, pero resultan caras de construir y a menudo deben enfrentarse a una fuerte oposición local. De hecho, la aprobación de nuevas líneas en EE.UU. y Alemania procede con lentitud.

Al final, una adopción masiva de energías renovables exigiría reconfigurar por completo la infraestructura energética. En lo que se refiere a la electricidad, ello supondría pasar de un número relativamente reducido de grandes centrales térmicas e hidráulicas a uno mucho mayor de instalaciones eólicas y solares menores y más distribuidas. Para los combustibles líquidos, se requeriría abandonar la extracción de petróleo, muy energético, en favor de la producción de biocombustibles de menor rendimiento. En numerosos aspectos, la transición a las renovables se muestra más exigente que los cambios anteriores al petróleo y al gas natural.

La principal razón de que las transiciones energéticas se demoren tanto obedece al tremendo coste que implica sustituir una infraestructura gigantesca. Aunque la energía renovable fuera gratis, resultaría impensable que países, empresas y municipios abandonaran las enormes inversiones realizadas en instalaciones para combustibles fósiles: desde minas de carbón, pozos de petróleo, oleoductos y refinerías hasta millones de gasolineras locales. Se estima que el valor de dicha infraestructura en todo el mundo asciende a no menos de 20 billones de dólares. Solo China gastó medio billón de dólares para añadir 300 gigavatios a su capacidad de producción en centrales de carbón entre 2001 y 2010 (más que toda la capacidad generadora de origen fósil de Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España juntas). El país espera que esas centrales presten servicio durante al menos 30 años. Ningún Estado tiraría por la borda una inversión así.

¿QUÉ HACER?

Seamos claros. Abundan las razones de índole ambiental para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Aparte de las emisiones de gases de efecto invernadero, su quema emite óxidos de azufre y nitrógeno, causantes de lluvia ácida y esmog fotoquímico; hollín, que también contribuye al calentamiento global, y metales pesados perjudiciales para la salud. Además, su uso contamina las aguas y estropea las tierras. Abandonarlos sería sin duda deseable, si bien algunas alternativas conllevan sus propios impactos ambientales.

La verdadera pregunta es cómo conseguir una transición eficaz. Saber que el cambio tardará decenios en llegar permite aclarar unas cuantas opciones. Hasta ahora, la política energética de EE.UU. y del resto del mundo ha sido funesta. En vez de modas cortoplacistas propiciadas por el voluntarismo, necesitamos políticas a largo plazo basadas en expectativas realistas y tomar decisiones que luego no nos pesen, en lugar de compromisos apresurados y mal concebidos.

Una manera de lograrlo pasa por no elegir ningún caballo ganador. Los Gobiernos no pueden predecir qué investigaciones más o menos prometedoras llegarán primero al mercado, por lo que no deberían apostar por supuestos vencedores para después abandonarlos por la siguiente opción de moda (al respecto, baste recordar los reactores reproductores rápidos o los coches de hidrógeno). La mejor estrategia consiste en diversificar la inversión. ¿Quién habría adivinado en 1980 que, durante las tres décadas siguientes, la mayor recompensa no vendría de los reactores nucleares ni de las placas fotovoltaicas, sino de la perforación horizontal y la fracturación hidráulica de los depósitos de esquisto?

Los Gobiernos tampoco deberían conceder grandes subvenciones ni avalar préstamos a empresas que se dedican a subirse al carro de la última moda. Así ocurrió en EE.UU. con Solyndra, un fabricante de sistemas fotovoltaicos que recibió 535 millones de dólares solo para quebrar después. Es cierto que las subvenciones pueden acelerar un cambio incipiente, pero deben estar guiadas por valoraciones realistas y compromisos firmes, no saltar de una gran «solución» a otra.

Al mismo tiempo, el precio de cualquier fuente de energía debería reflejar los costes reales de generación, los cuales comprenden las repercusiones ambientales y sanitarias tanto a corto como a largo plazo. Tales impactos incluyen los gases de efecto invernadero y el hollín emitidos por los combustibles fósiles; la erosión del suelo, las escorrentías de nitrógeno y la merma de agua provocadas por el cultivo de maíz para etanol; así como el coste de una extensa red de alta tensión para enlazar granjas eólicas y solares dispersas. Este ejercicio de realismo puede revelar las ventajas a largo plazo de cada fuente de energía.

El mejor modo de acelerar la transición gradual hacia las energías renovables es reducir el consumo global. Cuanto más rápido crezca la demanda, tanto más difícil será satisfacer una fracción considerable. Algunos estudios recientes han demostrado que no existen problemas técnicos insuperables para reducir el consumo energético en un tercio, ni en los países desarrollados ni en los emergentes, principalmente con medidas de eficiencia energética. Conforme se reduzca la demanda, podrán ir retirándose los combustibles fósiles. Los ciudadanos y los dirigentes de los países ricos deben también aceptar que, durante el último medio siglo, el precio de la energía, por más que haya aumentado, se ha mantenido extraordinariamente bajo en términos históricos. Esos países deberían pagar más para responder de las consecuencias ambientales y sanitarias.

Tanto a una escala nacional como mundial, las transiciones energéticas constituyen procesos lentos. Cambiar los combustibles fósiles por energías renovables no será una excepción: requerirá generaciones de perseverancia.

PARA SABER MÁS

Energy transitions: History, requirements, prospects. Vaclav Smil. Praeger, 2010.

Monthly Energy Review. U.S. energy information administration. **www.eia.gov/mer**

EN NUESTRO ARCHIVO

Energía y sostenibilidad. Temas de *IyC* n.º 67, 2012.

Atrapar el viento. Davide Castelvecchi en *IyC*, abril de 2012.

El futuro de la energía solar. Bernd Müller en *IyC*, mayo de 2012.

El futuro de la energía eólica. Gerhard Samulat en *IyC*, junio de 2012.

Natalie Pigeard-Micault, doctora en epistemología e historia de la ciencia, es investigadora del CNRS y tiene a su cargo los archivos del Museo Curie, en París.



HISTORIA DE LA QUÍMICA

Wurtz y la hipótesis atómica

¿Está la materia constituida por átomos? A lo largo del siglo XIX, esta cuestión dividió a los químicos. En la vida de Charles-Adolphe Wurtz, ocupó un lugar central

Natalie Pigeard-Micault

A PRINCIPIOS DEL SIGLO XIX LA QUÍMICA ERA YA UNA CIENCIA. EN 1787, EL FRANcés Antoine Laurent de Lavoisier la había dotado de un lenguaje lógico y de una metodología: los elementos químicos se definen como cuerpos simples, ya sea por naturaleza o por la falta de aparatos para dividirlos. En cuanto a la metodología, era clara: observar, pesar, medir y experimentar. Sin embargo, en 1808, una obra del profesor británico de ciencias John Dalton, titulada *El nuevo sistema de filosofía química*, hizo tambalear por mucho tiempo ese bello edificio. Acogido favorablemente por los químicos en un primer momento, Dalton sembró entre ellos una cizaña que duraría casi un siglo. ¿Por qué? Porque Dalton hablaba en esa obra del átomo, y el átomo era invisible.

Aunque el concepto de átomo data de la Antigüedad, a principios del siglo XIX había caído en el olvido. Según Dalton, la materia podría estar constituida por átomos indivisibles (del griego *a-tomon*, «que no puede dividirse»), idénticos entre ellos para un mismo elemento, con un peso fijo y que podían combinarse para formar compuestos. Pero para muchos químicos era inconcebible reintroducir una hipótesis, algo imaginado, en su ciencia, basada en la observación y la experimentación.

En Francia, el debate sobre la existencia del átomo cristalizó alrededor de dos químicos: Charles-Adolphe Wurtz, ferviente defensor de la hipótesis atómica, y Marcellin Berthelot, partidario de una ciencia en la que las hipótesis no tenían cabida.

EN SÍNTESIS

El modelo atómico de John Dalton desató un intenso debate entre los químicos del s. XIX. El problema radicaba en que los átomos eran entonces entes invisibles, hipotéticos y, por tanto, sin cabida en el mundo de la experimentación.

Jean-Babtiste Dumas y Marcellin Berthelot encabezaron la guerra contra la teoría atómica. La acusaban de alejarse de los hechos observables y medibles. Incluso la Iglesia la criticó por demasiado materialista.

Al otro lado de la palestra, Charles-Adolphe Wurtz. Convencido del poder de las herramientas teóricas, defendió y divulgó durante toda su vida el modelo atómico. Desterrada de los textos escolares en 1836, la palabra «átomo» reapareció en 1894.

A. LESCURE/INSTITUTO CURIE

¿Quién salió vencedor? Veremos que la respuesta no es tan sencilla. Para comprenderlo, volvamos al momento en el que Dalton publicó su libro.

En un primer momento, no es precisamente la hipótesis de Dalton sobre la constitución de la materia la que atrae la atención de los químicos. Al fin y al cabo, el átomo de Dalton puede comprenderse como el elemento de Lavoisier. Lo que les interesa es la teoría de los «pesos atómicos». Según Dalton, el agua consta de un átomo de oxígeno (que hoy en día se indica con el símbolo O) y un átomo de hidrógeno (H). Describe, por tanto, el agua mediante la fórmula química siguiente: H + O = HO. Ahora bien, en nueve gramos de agua hay un gramo de hidrógeno y ocho gramos de oxígeno. Generalizando este razonamiento y tomando como base el hidrógeno igual a 1, se calcula el peso de cada átomo. Asociada a nuevos descubrimientos que permiten subdividir las sustancias compuestas, esta teoría de los pesos atómicos permite resaltar la presencia de numerosos cuerpos simples.



LABORATORIO DE QUÍMICA DE HENRI DEBRAY en la Escuela Normal Superior hacia 1885. Debray era ayudante de Henri Sainte-Claire Deville, uno de los químicos que se opusieron a la teoría atomista de la materia defendida por Charles-Adolphe Wurtz.

¿ÁTOMO O MOLÉCULA?

Sin embargo, pocos meses después de la publicación de Dalton, el francés Joseph Louis Gay-Lussac denunció la inconsistencia de la teoría atómica. Trabajando no a partir de pesos, sino de volúmenes, Gay-Lussac no obtiene los mismos resultados que Dalton. En sus experimentos, al tomar un volumen de hidrógeno y un volumen de cloro obtiene dos volúmenes de ácido clorhídrico y no un volumen, como afirma la teoría de Dalton. ¿Cómo eliminar esta contradicción?

El químico italiano Amedeo Avogadro y el físico francés André Marie Ampère llegan por separado a la misma conclusión: para obtener, a partir de dos volúmenes de gases diferentes, dos volúmenes de gas compuesto, debemos aceptar que los átomos de Dalton todavía se pueden dividir. En otras palabras, el elemento constitutivo del gas de hidrógeno (lo que Dalton llama átomo de hidrógeno) está constituido en realidad por dos cuerpos aún más sencillos.

Al dividir los átomos de Dalton, Avogadro y Ampère introducen la distinción entre átomo y molécula: el hidrógeno gaseoso es una molécula constituida por dos átomos. Al generalizar la experiencia, promulgan una ley conocida hoy como ley de Avogadro (o ley de Avogadro-Ampère): volúmenes iguales de distintos gases, sometidos a las mismas condiciones de temperatura y presión, contienen siempre el mismo número de moléculas. Aplicada a las teorías de Dalton y de Gay-Lussac, esta ley estipula que una molécula de un gas simple consta siempre de dos átomos. Para muchos químicos, constituye la prueba de la existencia de los átomos.

No obstante, si bien esta ley se cumple para la mayoría de los gases, los hay que presentan problemas. El fósforo, el azufre, el mercurio y el arsénico no parece que estén formados por dos átomos. Jean-Baptiste Dumas, químico francés de renombre, examina esta incoherencia. Al no lograr explicar la excepción, se enzarza en una guerra contra la teoría atómica, de la que anteriormente había sido un ferviente defensor. Está seguro de que este error científico se debe a un extravío epistemológico. La química se pierde en la investigación especulativa sobre la constitución íntima de la materia. Para seguir siendo una ciencia no tendría que haberse alejado nunca de los hechos observables. Debería haberse contentado con traducirlos mediante leyes claras y sencillas, que no necesitan buscar lo invisible para justificarse.

En 1836, Dumas reniega de su pasado atomista e invita a sus colegas a hacer lo mismo: «Lo que nos queda es la convicción de que la química se ha apartado de su lugar, como siempre, cuando, al abandonar la experiencia, ha querido caminar sin ninguna guía a través de las tinieblas [...]. Si de mí dependiera, borraría de la ciencia la palabra átomo, convencido de que va más allá de la experiencia; y en química, nunca debemos ir más allá de la experiencia».

Desde entonces (y hasta 1894), la palabra «átomo» es desterrada de los libros escolares. Dumas regresa a un sistema de anotación más neutro: el de los pesos equivalentes. Medidos en la balanza, estos expresan las proporciones ponderales de los componentes de una reacción; como el peso atómico de Dalton, pero sin átomos hipotéticos.

UNA CACOFONÍA DE NOTACIONES

Pasar tan fácilmente de una notación a otra no resulta fácil, sobre todo cuando, tras la notación, se halla en juego toda la definición de la práctica científica. Y más si tenemos en cuenta que, en química, los resultados se van acumulando. Algunos descubren nuevas sustancias, otros establecen leyes sobre su afinidad, sobre sus cargas eléctricas, sobre la disposición de los cuerpos simples en un compuesto, etcétera. Esas innumerables investigaciones multiplican los sistemas de notación.

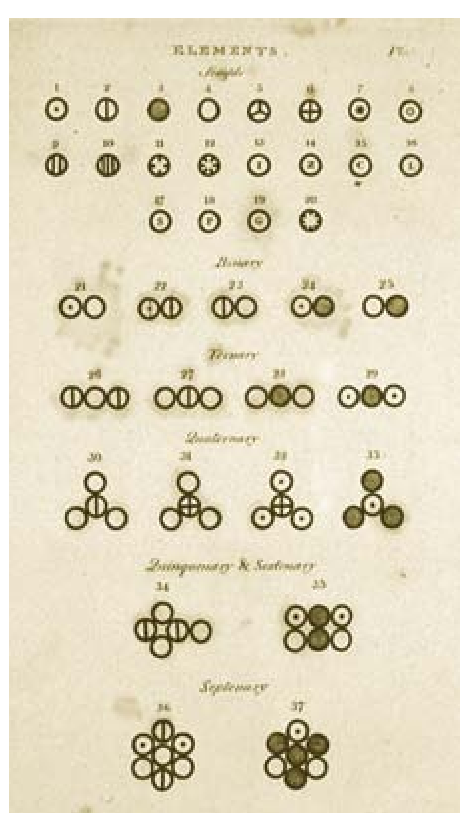
Entre los que toman como base el hidrógeno (H = 1), los hay que se expresan en peso equivalente (por lo que el oxígeno vale ocho, O = 8) y otros lo hacen en peso atómico, según la ley de Avogadro (por lo que el oxígeno vale dieciséis, O = 16). Los atomistas, como Berzelius, llegan a tachar los símbolos químicos para diferenciarlos de los equivalentes. También hay quien toma como base el oxígeno, considerando O = 100, o incluso O = 1. Asímismo, se encuentra H = 100. No importa que el químico sea francés, inglés, de Prusia o de otro lugar; hay que conocer al autor del artículo leído para saber qué conversión debe realizarse para comprenderlo. La química se vuelve entonces una ciencia de conversión más que otra cosa.

En medio de esta cacofonía de notaciones, fórmulas, leyes y teorías, el joven Wurtz entra en el mundo de la química. Tras estudiar medicina en Estrasburgo y pasar algún tiempo en el laboratorio del alemán Justus von Liebig en 1842, Wurtz llega al laboratorio privado de Dumas en 1844. Presidente de la Academia de Ciencias, miembro de la Academia de Medicina, profesor de química orgánica de la Facultad de Medicina, profesor de química y decano de la Facultad de Ciencias, Dumas representa entonces el poder científico en Francia.

Dumas toma rápidamente a Wurtz bajo su tutela. Le proporciona trabajo remunerado, lo introduce en la comunidad científica y le ayuda a promocionarse. Por su parte, Wurtz sabe que Dumas tiene las riendas del poder en ese campo de batalla teórica que es la química, por lo que no participa en la polémica.

Cuando, a finales de 1852, Dumas presenta su dimisión en la Facultad de Medicina, Wurtz es nombrado —naturalmente— para ocupar su puesto, el 2 de febrero de 1853. La independencia que entonces adquiere con respecto a Dumas le permite finalmente entrar en la batalla científica. Desde 1853, ante la Academia de Ciencias, Wurtz dice buscar en las fórmulas químicas «un verdadero sentido molecular»: quiere comprender la disposición invisible de la materia y traducirla mediante fórmulas. Tres años más tarde, descubre una nueva familia de moléculas, los glicoles. Dice que se ha guiado por la teoría y no por la experiencia. Se atreve incluso a hablar de molécula diatómica, aceptando así la ley de Avogadro.

Cuando, en 1860, relata la historia de su descubrimiento, utiliza por primera vez la notación atómica. Hay que decir que acaba de regresar de un congreso internacional organizado para poner fin a la multiplicidad de las notaciones. Como consecuencia de la campaña del italiano Stanislao Cannizzaro, la mayoría de los químicos europeos, incluido Wurtz, adopta la notación atómica, considerada la más fértil. Pero la mayor parte de los químicos franceses, que al principio se opusieron a esta notación, no participan en el congreso; en Francia, Wurtz se convierte en defensor de una notación que siempre resulta excluida.



SÍMBOLOS de los elementos químicos utilizados en 1808 por John Dalton en su *Nuevo sistema de filosofía química*. Dalton usaba pequeños círculos diferentes para los 36 elementos químicos conocidos entonces. Los símbolos actuales fueron introducidos en 1813 por el sueco Jöns Berzelius.

BOLAS PARA REPRESENTAR LOS ÁTOMOS

Wurtz se da cuenta de que, para lograr que la notación atómica sea admitida, tiene que enseñarla y divulgarla. Siendo profesor en la Facultad de Medicina, abre un pequeño laboratorio privado de química: allí convencerá a la futura elite de químicos. A medida que sus discípulos van ocupando cargos en la nueva Sociedad Química, esta se convierte —a través de su boletín— en un órgano de difusión de la notación atómica. De éxito en éxito, Wurtz afirma e impone cada vez más esta notación, e incluso la teoría atómica. También la enseña en el Colegio de Francia durante el verano de 1863.

En el ínterin, Wurtz encuentra un oponente de gran talla: Marcellin Berthelot. Entre los dos ya había una guerra por obtener cargos, honores y distinciones. Se añade entonces otra batalla científica, entre quien rechaza la misma palabra «átomo» y quien escribe usando la notación atómica y defiende la validez de la teoría asociada a dicha notación.

Un acontecimiento aleja entonces a Wurtz de la química. A finales de 1865, ante las protestas estudiantiles, el decano de la Facultad de Medicina, Ambroise Tardieu, presenta la dimisión. Ningún médico quiere ocupar su puesto ni es propuesto para el decanato. El 18 de enero de 1866, Wurtz, que no es más que un simple profesor de química —ciencia que en medicina se considera auxiliar— es nombrado nuevo decano. El nuevo cargo lo aleja de la batalla del átomo durante diez años.

Con todo, recupera cierto protagonismo de forma inesperada. En 1868, la Iglesia, que considera demasiado materialistas las enseñanzas que se imparten en la facultad, denuncia las consecuencias inmorales y peligrosas de tal concepción del ser humano. En nombre de la autonomía de la ciencia, Wurtz condena esa intrusión del clero. Su discurso, reproducido en la prensa, es destacado y distorsionado: ¿Wurtz defiende la enseñanza de la facultad? Si es así, es materialista, sobre todo si se tiene en cuenta que es atomista... Wurtz, protestante fervoroso que concibe sin problemas la coexistencia de un cuerpo hecho de átomos y de un «alma», es tildado de materialista por los médicos. En cambio, los químicos, especialmente Berthelot, lo califican de espiritualista porque cree en ese átomo invisible.

En 1874, cansado de su decanato, Wurtz firma en Lille su regreso a la química con un discurso comprometido y muy conocido: «Lo que llena el espacio, es decir, la materia, no es divisible hasta el infinito, sino que está formado por un mundo de partículas invisibles, que no podemos tocar, y que no obstante tienen una superficie real y un peso determinado. Son los átomos». Por primera vez, Wurtz no se conforma con la defensa de la notación atómica: afirma que cree en la existencia real de los átomos.

Wurtz llega a revelar toda su concepción de la ciencia: dice que el objetivo del científico es «investigar la naturaleza íntima de los fenómenos y de sus causas». Sin embargo, para Berthelot, si la naturaleza de los fenómenos es invisible e inaccesible, se inscribe en un campo de reflexión que no es científico, sino metafísico. La ciencia no especula.

Dos años más tarde, Wurtz reitera sus afirmaciones. En Clermont-Ferrand, ayudándose de unas bolas pequeñas de diferentes colores, muestra al público cómo se disponen los átomos para formar las moléculas: «Construí esta fórmula con bolas negras, blancas y verdes, que representaban átomos de carbono, de hidrógeno y de nitrógeno. Lo entendieron, o creyeron que lo habían entendido, porque aplaudieron. Me siento orgulloso de este éxito de la teoría», escribió a un alumno suyo.





EL QUÍMICO CHARLES-ADOLPHE WURTZ (1817-1884) fue toda su vida un ardiente defensor de la idea de una materia formada por átomos (*izquierda*). Tuvo varios adversarios, entre ellos Marcellin Berthelot (*derecha*), que no podía imaginarse una ciencia basada en elementos invisibles.

Los partidarios de los pesos equivalentes ya no pueden callarse. Wurtz, que ya no es decano, logra en 1875 la creación de una cátedra de química orgánica en la Facultad de Ciencias, en la que él deberá enseñar «las teorías modernas de la química» a futuros químicos. El 9 de abril de 1877, el químico Henri Sainte-Claire Deville dice, ante sus compañeros académicos, que la ley de Avogadro no es más que una «hipótesis pura y simple, socavada por los hechos y el razonamiento de todo tipo».

Wurtz y Sainte-Claire Deville se han hecho amigos y se aprecian. No obstante, Wurtz se cree en la obligación de responder y defender la ley de Avogadro, que es la base de la teoría atómica. El 7 de mayo de 1877, en la Academia, demuestra que dicha ley no es más que el desarrollo de leyes que reivindican los equivalentistas, en particular la de Gay-Lussac.

El 21 de mayo, Sainte-Claire Deville sube al estrado y demuestra mediante resultados experimentales que la ley de Avogadro no se cumple con todos los elementos, sobre todo en la química inorgánica. En este sentido, vuelve a los argumentos de Dumas de 1836: la ley no se cumple para el fósforo, el mercurio, etcétera. Wurtz reconoce entonces que esta funciona mejor en química orgánica, pero lo explica: la ley se aplica a los cuerpos volátiles, teniendo presente que ciertas sustancias inorgánicas se descomponen cuando se intenta volatilizarlas.

¿PUEDE UNA CIENCIA FUNDARSE EN LO INVISIBLE?

El debate es puramente científico y se basa en resultados de experimentos con hidrato de cloral, clorhidrato amónico, etcétera. Pero a Berthelot le gustaría llevarlo del campo experimental a la filosofía de la ciencia. ¿Puede una ciencia basarse en hipótesis?

El 28 mayo, Berthelot interviene en la discusión convencido de que va a resolver el conflicto entre el átomo y el equivalente. Para comenzar, sitúa el debate en un plano epistemológico al tratar de demostrar la confusión entre ley e hipótesis, imaginación y observación. La de Avogadro, por ejemplo, ya cuestionada por Sainte-Claire Deville, no puede ser una ley, dado que pretende contar moléculas y átomos, que son invisibles.

Wurtz no puede aceptar que el debate salga del campo experimental. A riesgo de desacreditarse como científico, no puede, como en una conferencia para un público de provincias, confesar que basa su práctica científica en lo invisible, en un momento de la historia de la ciencia en el que solo la experimentación y la observación garantizan el proceso científico. Para zanjar la cuestión, él también afirma, aunque de mala fe, el carácter hipotético del átomo. Para él, solo la notación está en juego. Por si acaso, Berthelot vuelve al tema y añade: «En el fondo de su notación equivalente se oculta la misma idea de partículas pequeñas y usted cree en ellas tanto como nosotros».

Entre el 9 de abril y el 25 de junio, los académicos asisten a dieciséis intervenciones sobre el tema. Por primera vez, ni Wurtz ni Berthelot salen vencedores ni vencidos. Wurtz no ha admitido que creía en el átomo como una entidad real y ha puesto de manifiesto la fecundidad de la teoría atómica. Berthelot, al condenar públicamente el uso de hipótesis en ciencias, también puede considerarse en parte victorioso.

Wurtz muere en 1884. Sus alumnos más fieles (Henninger, Friedel, Scheurer-Kestner) le siguen pronto. Berthelot sobrevive. El átomo reaparece en los textos escolares en 1894. La notación atómica casi ha ganado. No obstante, la mayoría de los químicos atomistas, incluso entre los alumnos de Wurtz, afirman que aún no creen en la existencia real de los átomos. En 1900, cuando se halla en la cima de su gloria y poder, Berthelot dice que él no desea que se crea «en la existencia real de los átomos como se cree en la existencia de Jesús en la hostia consagrada». Acaba por utilizar la notación atómica, pero muere en 1907 sin haber creído nunca en la existencia del átomo, a pesar de que los físicos están tratado de entender su constitución y de que el descubrimiento del electrón ha cumplido ya diez años.

PARA SABER MÁS

Histoire d'atomes. P. Radvanyi y M. Bordry. Belin; París, 1990.
Histoire de la chimie. B. Bensaude-Vincent e I. Stengers. La Découverte, 1993.
L'atome: chimère ou réalité? Débats et combats dans la chimie du XIXe siècle. C. Lécaille. Vuibert/ADAPT-SNES, 2009.
Un savant dans la tourmente. Charles-Adolphe Wurtz. Hermann/ADAPT-SNES, 2011.

MECÁNICA DE FLUIDOS

MUROS DE AGUA

Lo mismo que otros fenómenos caóticos, las corrientes oceánicas suelen considerarse inherentemente impredecibles. Nuevas herramientas matemáticas permiten abordar su intrincado comportamiento

Dana Mackenzie

En verano de 2010, el golfo de México se vio afectado por un sobrecogedor derrame de petróleo. A medida que el crudo brotaba de la plataforma Deepwater Horizon, instalada por la compañía BP en aguas de Luisiana, los turistas comenzaron a abandonar en masa toda la costa, convencidos de que la marea negra se aproximaba a la orilla o lo haría de inmediato. En localidades tan alejadas como Fort Myers y Cayo Largo, en Florida, las playas quedaron desiertas y la ocupación hotelera cayó en picado.

En realidad, la situación nunca llegó a ser tan desesperada, sobre todo en la costa oeste de Florida. Durante el tiempo que duró el derrame, una barrera invisible protegió aquella zona del avance del crudo e impidió su propagación hacia el este. Aquel obstáculo no era ningún cuerpo sólido, sino un muro de agua que se desplazaba poco a poco conforme lo hacían las corrientes oceánicas. A pesar de estar formado por agua, aquella barrera se mostró tan efectiva como cualquier malecón o estructura de contención.

Conocidas como «barreras de transporte», tales estructuras pueden considerarse el equivalente marítimo de las divisorias continentales. Separan el agua que circula en un sentido de la que avanza en el opuesto. Al igual que un mapa de carreteras, que nos informa sobre el flujo del tráfico, las barreras de transporte restablecen una medida de orden en un océano por lo demás caótico e impredecible.

Aunque para muchos su importancia pasa aún inadvertida, el análisis de dichas estructuras ha florecido durante los últimos años. Su estudio permitió demostrar por qué el petróleo superficial del golfo de México desapareció más rápido de lo esperado y por qué no se produjeron fugas hacia el Atlántico a través del estrecho de Florida. De cara a desastres futuros, una mejor comprensión del fenómeno permitiría optimizar las labores de limpieza. En lo referente a otros sistemas turbulentos, la misma línea de investigación podría ayudar a esclarecer la manera en que el flujo sanguíneo afecta a la formación de placas en las arterias, así como facilitar pronósticos sobre las corrientes atmosféricas de esporas alérgenas.

ORDEN Y CAOS

La teoría del caos alcanzó su mayoría de edad hacia la década de los setenta. Unos años antes, la comunidad científica se había percatado de que, en ciertos fenómenos naturales, incluso las perturbaciones más pequeñas podían desencadenar cambios drásticos. El ejemplo al que siempre se recurre para ilustrar dicho comportamiento es el aleteo de una mariposa: en principio, los diminutos cambios en las corrientes de aire provocados por el batir de sus alas podrían acumularse en cascada y derivar, semanas más tarde, en un tornado en la otra punta del planeta.

Los fluidos constituyen el ejemplo por antonomasia de sistema caótico. Su dinámica abarca fenómenos de todo tipo, desde la corriente del Golfo hasta la circulación del aire a través de un aerogenerador, pasando por la trayectoria de un balón de fútbol en un lanzamiento de penalti. Las ecuaciones básicas que rigen el comportamiento de los fluidos fueron formuladas hace casi dos siglos por Claude-Louis Navier y George Stokes. Pero conocer las ecuaciones no implica saber resolverlas. Y, de hecho, el estudio de las soluciones generales de las ecuaciones de Navier-Stokes sigue siendo, aún hoy, uno de los problemas matemáticos más peliagudos que se conocen.



Dana Mackenzie es doctor en matemáticas por la Universidad de Princeton y divulgador científico. Su último libro es *The universe in zero words* («El universo en cero palabras», Princeton University Press, 2012).

Al menos en principio, una solución exacta de las ecuaciones de Navier-Stokes permitiría describir con todo detalle la evolución de un fluido. Sin embargo, el grado de precisión con el que podrá determinarse su comportamiento futuro dependerá de la minuciosidad con la que conozcamos su estado presente, lo que los matemáticos denominan «condiciones iniciales». Pero, dado que es imposible saber hacia dónde se dirige cada molécula de agua en el océano, y que en un sistema caótico toda incertidumbre —como el batir de las alas de una mariposa— aumenta exponencialmente con el tiempo, cualquier solución de las ecuaciones de Navier-Stokes se tornará rápidamente inservible.

No obstante, «caótico» no significa «aleatorio». Durante los últimos diez años, los matemáticos han desarrollado un marco teórico para entender ciertas estructuras que, como las barreras de transporte, se forman en el seno de un fluido y persisten en él durante cierto tiempo. En 2001, el matemático George Haller, hoy en el Instituto Politécnico de Zúrich, las bautizó con un nombre bastante aparatoso: estructuras coherentes lagrangianas. En un lenguaje más poético, Haller las describe como «el esqueleto de la turbulencia». Una vez localizadas, y aun a falta de una solución exacta de las ecuaciones de Navier-Stokes, resulta posible predecir a corto y medio plazo hacia dónde se verá arrastrado un objeto.

¿Qué aspecto presentan dichas configuraciones? Nos encontramos ante una de ellas cada vez que observamos un anillo de humo. Tales formaciones alojan una estructura coherente lagrangiana atractiva: una curva hacia la que fluyen las partículas, como si estuvieran atraídas por un imán. Por regla general, tales estructuras suelen ser invisibles, pero, al exhalar el humo, las partículas que lo componen se concentran a su alrededor y delatan su presencia.

Mucho más difíciles de visualizar resultan las estructuras coherentes lagrangianas repulsivas; aquellas que, en caso de ser visibles, se observarían como una curva que ahuyenta las partículas. Serían más fáciles de identificar si pudiéramos presenciar su comportamiento hacia atrás en el tiempo, ya que entonces atraerían partículas. A falta de esa posibilidad, la única manera de localizarlas consiste en efectuar un análisis computarizado de la dinámica del fluido. Aunque difíciles de observar, las estructuras repulsivas revisten gran importancia, ya que, como Haller ha demostrado, tienden a configurar barreras de transporte.

Un experimento realizado en verano de 2003 en la bahía de Monterrey, en la costa californiana, demostró que las estructuras coherentes lagrangianas pueden calcularse en tiempo real. Shawn C. Shadden, matemático del Instituto de Tecnología de Illinois, y sus colaboradores trazaron el comportamiento de las corrientes superficiales de la bahía con ayuda de cuatro estaciones de radar de alta frecuencia instaladas en el área. Al analizar los datos, dedujeron la existencia de una larga barrera de transporte que, durante la mayor parte del tiempo, atravesaba la bahía serpenteando desde punta de Pinos, en el extremo sur, hasta casi alcanzar la costa norte. Mientras que las aguas situadas al este de la barrera regresaban hacia la bahía, las del oeste se dirigían hacia el océano abierto. (En ocasiones, la barrera abandonaba punta de Pinos y se desplazaba mar adentro.) Sin duda, una información de ese estilo resultaría clave ante un derrame contaminante.

Para verificar si el mar se comportaba o no de esa manera, el equipo de Shadden se valió de cuatro boyas que distribuyó por la zona con ayuda del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey. Al colocarlas a lados opuestos de la barrera de transporte, observaron que, mientras que las de un lado acompañaban a las aguas que recirculaban hacia el interior de la bahía, las del otro se veían arrastradas por las corrientes que avanzaban hacia el sur, paralelas a la costa. Aunque en sus cálculos el equipo solo había empleado los datos correspondientes a tres días de observaciones, una boya situada en la zona de recirculación permaneció en la bahía durante 16 días. La robustez de aquellos resultados atestiguaba la intensidad y la persistencia de una barrera de transporte que, durante 16 días, se había alzado en el interior del océano como un verdadero muro de agua.

DEL OCÉANO AL TORRENTE SANGUÍNEO

Las estructuras coherentes lagrangianas explicarían por qué el petróleo superficial del golfo de México desapareció más rápido de lo esperado; mucho más, por ejemplo, que tras el derrame del *Exxon Valdez* en la costa de Alaska en 1989. (El paradero del petróleo subsuperficial ha suscitado mayor polémica; una gran parte puede que aún se encuentre en el fondo del mar.) Las aguas cálidas del golfo de México albergan multitud de microorganismos que se alimentan de los hidrocarburos que, de modo natural, se filtran en la zona. Si ese aporte excede el habitual, la población de bacterias crece. El microbiólogo Dave Valentine y el matemático Igor Mezic, ambos de la Universidad de California en Santa Bárbara, demostraron que, tras el derrame, los microorganismos acabaron congregándose en regiones determinadas por barreras de transporte. Sin duda, la estabilidad a largo plazo de dichas zonas facilitó la degradación del petróleo. Valentine apunta que todo hubiera sido distinto si el desastre hubiese ocurrido en las costas de Brasil, donde también se han descubierto yacimientos de petróleo en aguas profundas. Allí las corrientes se dirigen mar adentro, donde no existe ninguna reserva cautiva de bacterias capaz de dar cuenta de un vertido de hidrocarburos.

Del mismo modo, las barreras de transporte podrían explicar por qué el petróleo de la Deepwater Horizon no se incorporó a la

EN SÍNTESIS

Los fluidos constituyen el ejemplo por antonomasia de sistema caótico. En ellos, una pequeña alteración de las condiciones iniciales puede cambiar radicalmente su comportamiento futuro. Esa propiedad hace que, en la práctica, resulte imposible realizar predicciones a largo plazo.

Durante los últimos años se ha observado que ciertos fluidos desarrollan en su seno configuraciones relativamente estables, denominadas estructuras coherentes lagrangianas, o barreras de transporte: líneas invisibles que separan los regímenes de circulación de un fluido.

Una mayor comprensión de tales estructuras facilitaría las labores de búsqueda y limpieza tras un naufragio o un derrame de petróleo. También permitiría entender mejor otros fenómenos relacionados con fluidos turbulentos, como la circulación sanguínea o el tiempo meteorológico.

PÁGINAS ANTERIORES: ANDREW BANNECKER

corriente del Lazo, un chorro que atraviesa el estrecho de Florida en dirección al Atlántico. El 2 de julio de aquel verano (el hundimiento tuvo lugar en abril), la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU. anunciaba que la probabilidad de que el crudo se incorporase a la corriente era de entre el 61 y el 80 por ciento; una predicción basada en 15 años de datos históricos sobre la circulación oceánica en el golfo de México.

Al parecer, en 2010 concurrieron varias circunstancias afortunadas. En primer lugar, unos vientos del suroeste inusualmente intensos arrastraron la marea negra hacia el norte, alejándola de la corriente del Lazo. Por otro lado, un enorme remolino, apodado Eddy Franklin, se desprendió de la corriente del Lazo y la desplazó hacia latitudes más meridionales de lo habitual, con lo que interpuso una barrera entre el crudo y la corriente.

Los expertos aún discuten si cualquiera de esos fenómenos pudo haberse anticipado. Sin embargo, Haller y la oceanógrafa María Olascoaga, de la Universidad de Miami, han demostrado que otros cambios de apariencia caprichosa sí pudieron haberse predicho. El 17 de mayo, una enorme «cola de tigre» de petróleo (así llamada por su forma) avanzó 160 kilómetros hacia el sureste en un solo día. Según las simulaciones numéricas de Haller y Olascoaga, aquella mancha se habría desplazado a lo largo de una estructura coherente lagrangiana atractiva. La súbita inestabilidad podría haberse vaticinado una semana antes gracias a la formación de un núcleo atractivo en el seno de la estructura. Del mismo modo, a partir de la constitución de un núcleo repulsivo al este de la mancha, los expertos podrían haberse anticipado nueve días a una brusca retirada hacia el oeste que el frente de la marea negra experimentó el 16 de junio.

Además de las corrientes oceánicas, el estudio de las barreras de transporte ha permitido entender otros fenómenos. Shane Ross, del Instituto Politécnico de Virginia, ha investigado el efecto de las barreras de transporte atmosféricas en la distribución de patógenos en el aire. En colaboración con el botánico David Schmale, del mismo instituto, Ross se valió de un pequeño avión teledirigido para tomar muestras de aire a altitudes comprendidas entre decenas y centenares de metros sobre la ciudad de Blacksburg, en Virginia. Al atravesar una estructura atractiva o al cruzar dos configuraciones repulsivas contiguas, los investigadores detectaron un pico en el número de esporas del hongo *Fusarium*. Ross cree que, en el primer caso, las esporas experimentaron un tirón hacia las estructuras coherentes; en el segundo, habrían quedado atrapadas entre dos barreras repulsivas. Algunas esporas pertenecían a una especie que no medra en Virginia, lo que indicaba que las estructuras habían permanecido intactas el tiempo suficiente para que las esporas viajasen cientos de kilómetros.

Shadden estudia ahora el papel de las estructuras coherentes lagrangianas en el torrente sanguíneo. A partir de ellas, ha logrado delimitar la frontera entre la sangre bombeada en un latido de corazón y la expulsada en el siguiente. El investigador ha demostrado que, en un ventrículo de tamaño normal, la mayor parte de la sangre permanece allí durante dos latidos como máximo. Sin embargo, en un ensayo clínico se observó que, en seis sujetos que padecían hipertrofia cardíaca, parte de la sangre recirculaba durante más tiempo. Una circunstancia «ampliamente reconocida como factor de riesgo de trombosis», según escribió Shadden en una versión preliminar del estudio.

Más de una década después de que Haller les diese nombre, las estructuras coherentes lagrangianas aún están lejos de convertirse en una herramienta estándar en oceanografía y ciencias atmosféricas. Se objeta que, en caso de existir errores a la hora de medir las condiciones del fluido, estos se propagarían y afectarían a las predicciones relativas a dichas estructuras. No obstante, el experimento de la bahía de Monterrey indicó que el cálculo de la localización de las barreras de transporte parecía relativamente insensible a los errores de medición. Otro reparo guarda relación con la simulación de las estructuras, ya que el proceso requiere determinar por completo el campo de velocidades del fluido (su velocidad en cada punto). Pero, una vez conocido este, la evolución de una marea negra podría predecirse sin más que emplear los modelos computacionales ya existentes. Entonces, ¿para qué molestarse en calcular las estructuras coherentes lagrangianas?

Pero predecir el comportamiento de un fluido no agota sus posibilidades de estudio. Las técnicas de simulación retrospectiva podrían ayudar a determinar la procedencia de las manchas de petróleo que en ocasiones alcanzan las playas sin causa aparente. A menudo emanan de barcos hundidos. El *SS Jacob Luckenbach*, naufragado en las aguas costeras de San Francisco en 1953, comenzó a contaminar la costa de California hacia 1991, pero el origen de las manchas de petróleo no se aisló hasta 2002.

Lo mismo ocurre con los restos de un naufragio o un accidente aéreo. Dado que con los modelos oceánicos al uso resulta imposible dar marcha atrás en el tiempo, los equipos de rescate no pueden extrapolar retrospectivamente la trayectoria de los restos observados y dar con su procedencia. El oceanógrafo C. J. Beegle-Krause y el matemático Thomas Peacock, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, están investigando la utilidad de las estructuras coherentes lagrangianas para predecir hacia dónde arrastrarían las corrientes marinas a los supervivientes de un naufragio. Cualquier avance al respecto permitiría acotar el área de búsqueda y ganar tiempo en una situación en la que, a menudo, unos minutos de diferencia pueden suponer una cuestión de vida o muerte.

Pero las estructuras coherentes lagrangianas nos conceden algo más que pronósticos o simulaciones retrospectivas: amplían nuestra comprensión de los fluidos. Conocerlas permite interpretar mejor las predicciones de los modelos computacionales. Si un pronóstico vaticina que un filamento de petróleo se desplazará en una dirección determinada y se observa una estructura que lo atrae o lo repele, tendremos más motivos para confiar en dicha predicción. En caso contrario, tal vez haya razones para sospechar de ella.

Los matemáticos intentan ahora ampliar estas investigaciones a otras clases de estructuras organizadas en fluidos turbulentos, como remolinos y chorros. Una comprensión más profunda de su comportamiento permitirá abordar preguntas sobre fenómenos caóticos que hoy carecen de respuesta.

PARA SABER MÁS

The correlation between surface drifters and coherent structures based on high-frequency radar data in Monterey Bay. Shawn C. Shadden et al. en *Deep-Sea Research*, Part II: *Topical Studies in Oceanography*, vol. 56, n.º 3-5, págs. 161-172, febrero de 2009.

Forecasting sudden changes in environmental pollution patterns. María J. Olascoaga y George Haller en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, n.º 13, págs. 4738-4743, 27 de marzo de 2012.

Lagrangian coherent structures: The hidden skeleton of fluid flows. Thomas Peacock y George Haller en *Physics Today*, vol. 66, n.º 2, págs. 41-47, febrero de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

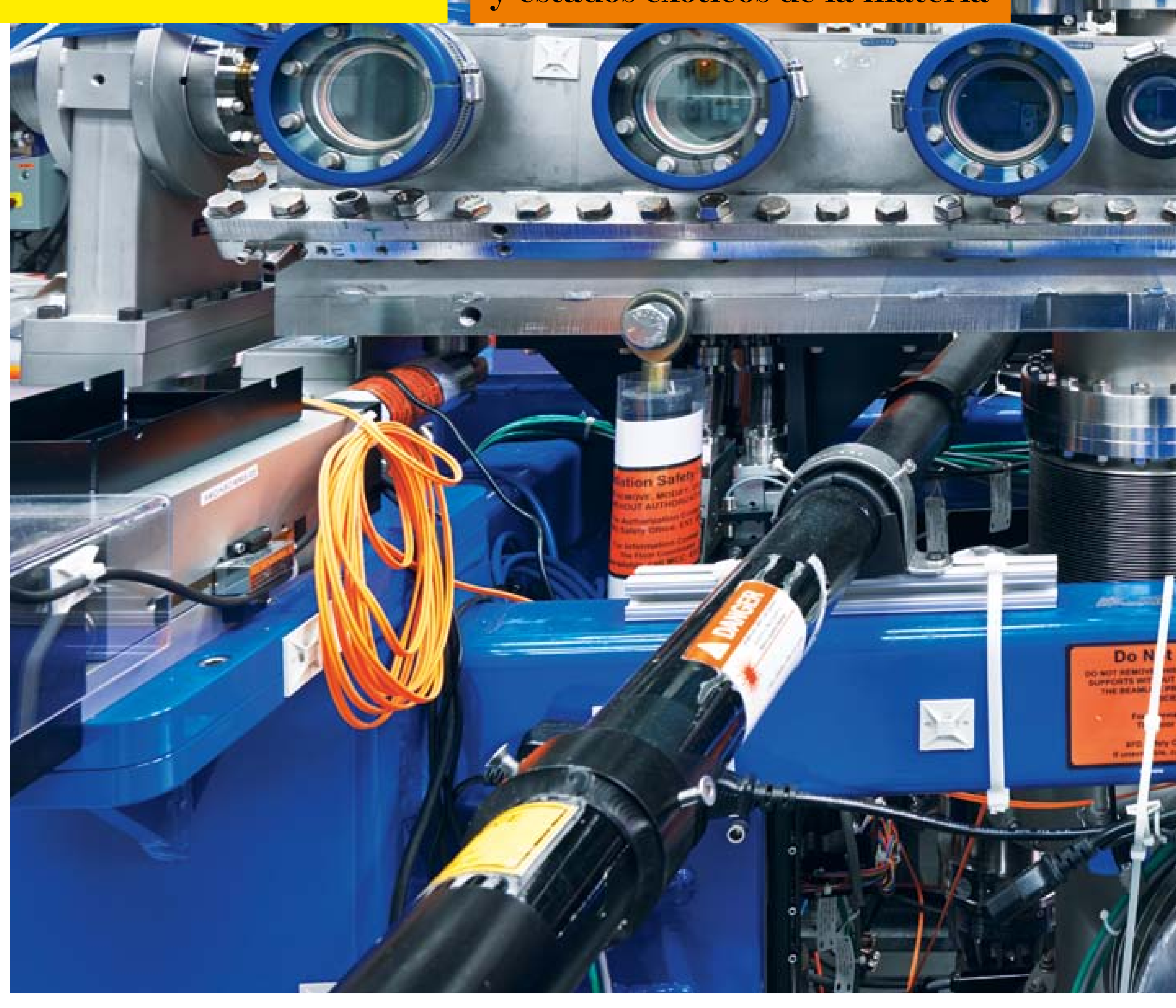
La Tierra, un planeta de fluidos. Ana María Mancho en *IyC*, octubre de 2013 (artículo del informe especial «Matemáticas del planeta Tierra»).

ÓPTICA

EL LÁSER DE RAYOS X DEFINITIVO

Lo que comenzó como una idea para un programa militar de los años ochenta ha evolucionado hasta convertirse en un potente microscopio que permite estudiar proteínas, reacciones químicas y estados exóticos de la materia

Nora Berrah y Philip H. Bucksbaum





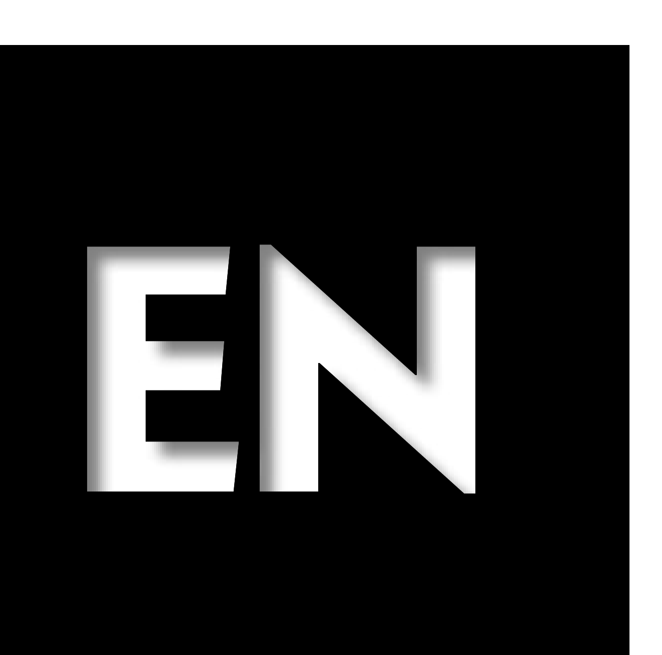
CÁMARA DE VACÍO (*estructura horizontal con ventanas y bridas azules*) con espejos diseñados ex profeso para hacer converger el láser de rayos X del SLAC en una anchura del tamaño de una mota de polvo.



Nora Berrah, directora del departamento de física de la Universidad de Connecticut, investiga la construcción de instrumentación avanzada para la LCLS. Es especialista en la interacción entre luz y materia. En 2014 recibió el premio Davisson-Germer en física de superficies o atómica, uno de los máximos galardones del ramo.



Philip H. Bucksbaum es profesor de la Universidad Stanford y director del Instituto PULSE, en el SLAC, dedicado a la investigación con láseres ultrarrápidos y al desarrollo de aplicaciones de la LCLS.



el punto de mira del láser de rayos X más potente del mundo, un átomo, una molécula o una mota de polvo no tienen ninguna oportunidad de sobrevivir. En menos de una billonésima de segundo, la materia se calienta a más de un millón de grados, una temperatura equiparable a la de la corona solar. Tal es la potencia del láser que, sometidos a él, los átomos de neón pierden al instante sus diez electrones. Una vez extraída esa capa protectora, explotan con violencia y salen despedidos de la muestra: una senda de destrucción que ejerce una particular atracción sobre los físicos.

Lo más sorprendente del proceso es que la radiación arranca los electrones de dentro afuera. En un átomo, los electrones se organizan en orbitales, como si fueran capas de cebolla. Pero no todos ellos reaccionan de la misma manera ante el láser de rayos X. Al igual que el café en un horno microondas se calienta mucho antes que la taza que lo contiene, las capas exteriores resultan casi transparentes a este tipo de luz. Así, la mayor parte de la radiación es absorbida por el orbital interior; los dos electrones de ese nivel escapan y dejan un espacio vacío. En pocos femtosegundos (10^{-15} segundos), otros pasan a ocupar ese hueco y el ciclo comienza de nuevo. Al final, todos los electrones son expulsados. El mismo proceso puede inducirse en moléculas y en cuerpos sólidos.

El extraño estado de materia así creado apenas dura unos femtosegundos. En los sólidos, se transforma en una fase ionizada (un plasma) conocida como materia densa caliente. Por lo general, esta solo se produce bajo condiciones muy extremas, como las que se dan en las reacciones de fusión nuclear o en el interior de los planetas gigantes. El fugaz y exótico entorno que puede generar un láser de rayos X carece de análogo en la Tierra.

El propio láser resulta tan espectacular como los fenómenos que desencadena. La Fuente de Luz Coherente del Acelerador Lineal de Stanford (LCLS), en California, trae a la memoria el sistema antimisiles concebido por el Gobierno de EE.UU. en los años ochenta. Popularmente conocido como «Guerra de las Galaxias», sus partidarios proponían usar láseres de rayos X para derribar satélites y misiles enemigos. Sin embargo, el desarrollo de la LCLS debe mucho más a los grandes aceleradores de partículas que se desarrollaron en aquella época. El ingenio de Stanford aprovecha para sus fines el acelerador lineal del laboratorio SLAC, una máquina a la que el país debe buena parte de los descubrimientos y premios Nobel que, durante décadas, lo han situado en la vanguardia de la física de partículas elementales.

Una parte del acelerador se rehabilitó como láser de rayos X en octubre de 2009. Desde entonces, la LCLS ha sido para la física atómica, la física de plasmas, la química, la materia condensada y la biología lo que el Gran Colisionador de Hadrones

EN SÍNTESIS

El primer láser de rayos X para investigación civil, la Fuente de Luz Coherente del Acelerador Lineal de Stanford (LCLS), comenzó a funcionar hace cuatro años. Su diseño aprovechó el acelerador de partículas del laboratorio SLAC.

Los haces generados por la LCLS se caracterizan por su elevada pureza e intensidad. Al incidir sobre átomos, moléculas y sólidos, pueden crear estados exóticos de la materia, imposibles de reproducir por otros medios.

La brevedad de sus pulsos permite emplearlos a modo de luz estroboscópica para captar imágenes de alta velocidad de proteínas y virus, mediante métodos alternativos a la cristalografía con radiación de sincrotrón.

FOTOGRAFÍAS DE SPENCER LOWELL



HAZ LÁSER DE RAYOS X a través de un conducto que une las dos salas experimentales de la Fuente de Luz Coherente del Acelerador Lineal de Stanford.

Anatomía de un láser de rayos X

La LCLS guarda cierto parecido con los láseres destructores de las películas de ciencia ficción. Su diseño aprovecha un acelerador lineal de partículas, una versión a gran escala de los cañones de electrones que empleaban los antiguos aparatos de televisión.

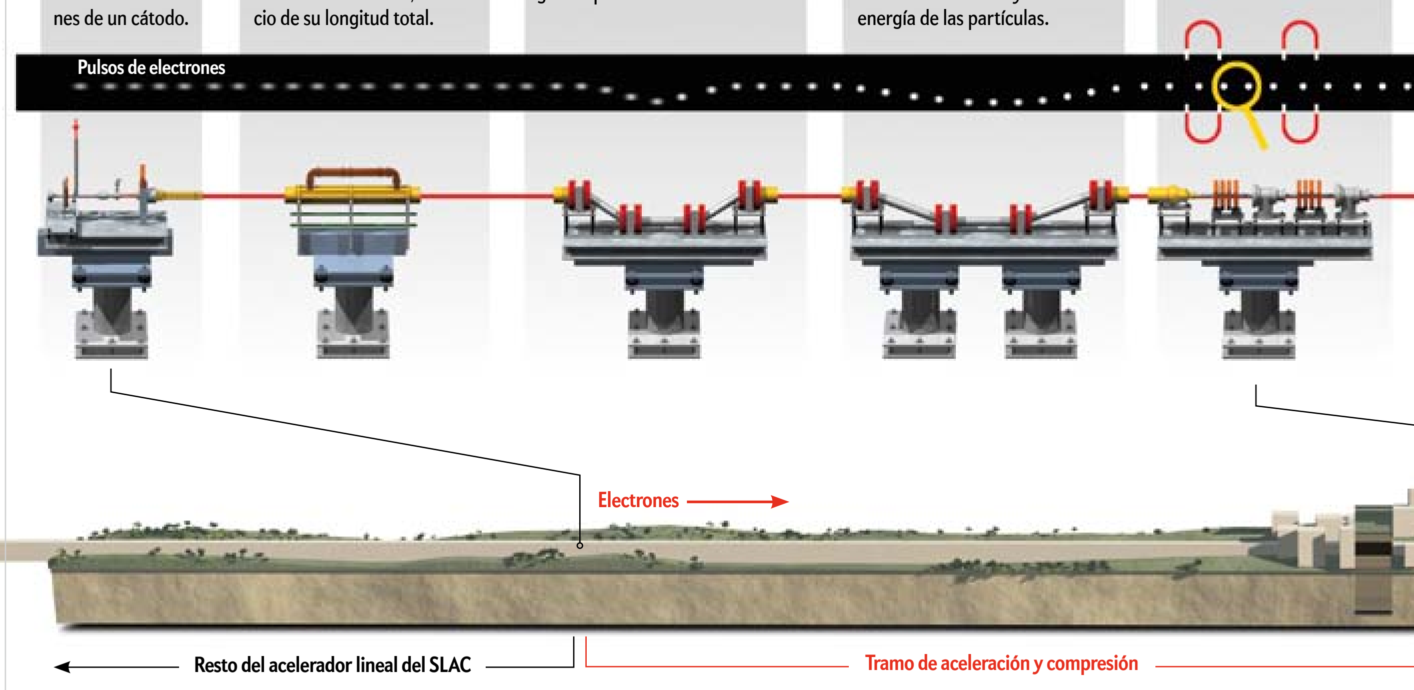
LÁSER IMPULSOR
Un primer láser genera pulsos de radiación ultravioleta que extraen electrones de un cátodo.

ACELERADOR
Los electrones se aceleran en un campo eléctrico hasta adquirir una energía de 12 gigaelectronvoltios. La LCLS aprovecha un kilómetro del acelerador del SLAC, un tercio de su longitud total.

PRIMER COMPRESOR DEL HAZ
Los pulsos de electrones trazan una suave curva en forma de S que uniformiza la disposición de las partículas con energías dispares.

SEGUNDO COMPRESOR DEL HAZ
Después de una fase de aceleración, los pulsos entran en un segundo compresor, más largo que el primero debido a la mayor energía de las partículas.

SALA DE TRANSPORTE
Una batería de imanes focaliza los pulsos y un sistema de control verifica que los electrones sigan la trayectoria adecuada.



del CERN es para la física de partículas: una gran máquina diseñada para bombardear los componentes fundamentales de la naturaleza con tremendas cantidades de energía y crear nuevas formas de materia, como átomos huecos. Sirve también como potente microscopio de alta velocidad para escudriñar el mundo cuántico. Los pulsos de rayos X generados por la LCLS son tan breves (unos pocos femtosegundos) que «congelan» el movimiento de los átomos, lo que permite observar cómo se desarrollan las reacciones químicas. Los pulsos poseen también una intensidad enorme, gracias a lo cual pueden obtenerse imágenes de proteínas y otras moléculas biológicas muy difíciles de estudiar con otras fuentes de rayos X.

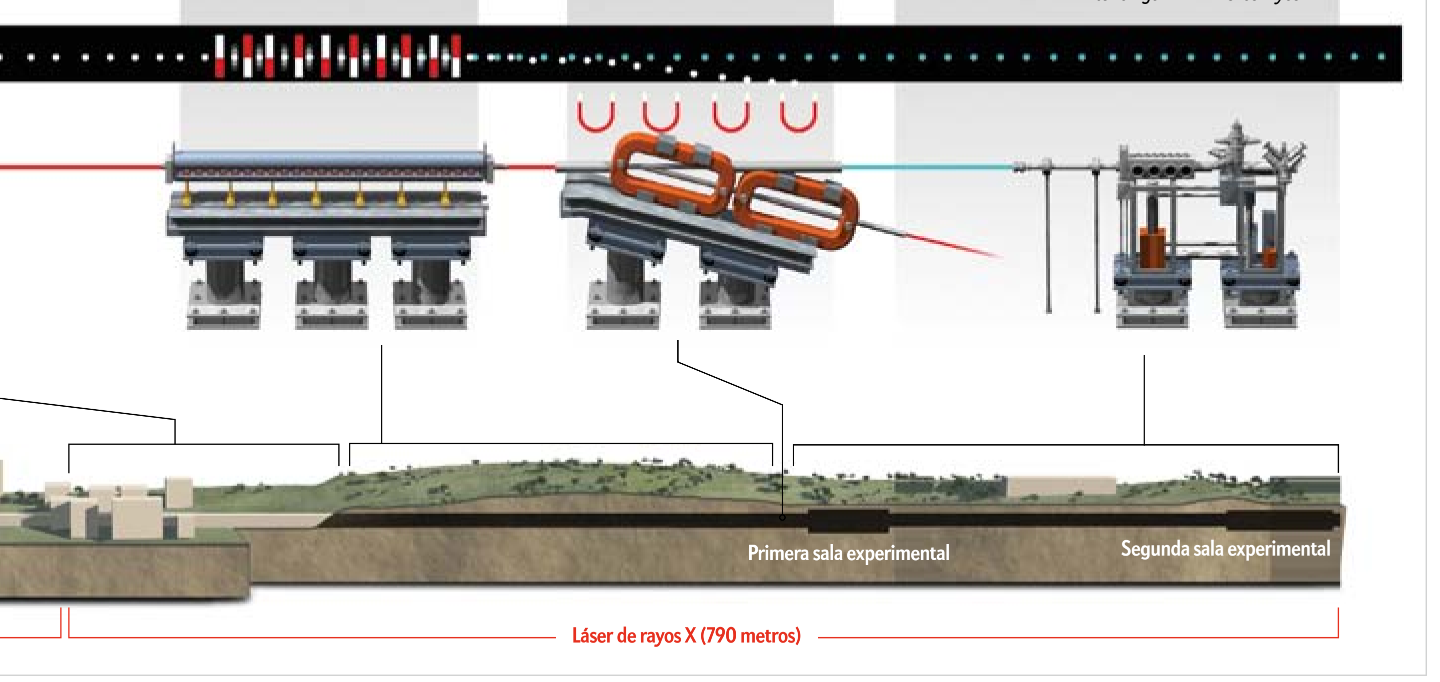
SOMBRAS DE ÁTOMOS

Los haces láser de rayos X de la LCLS aúnan las ventajas de dos de las principales herramientas de la física experimental moderna: fuentes de radiación de sincrotrón y láseres ultrarrápidos. Un sincrotrón es un acelerador de partículas con forma anular. Los electrones que circulan en su interior emiten rayos X, los cuales se dirigen luego hacia estaciones experimentales contiguas al anillo de aceleración. Uno de nosotros (Berrah) ha dedicado su carrera a usar radiación de sincrotrón para estudiar lo más recóndito de átomos, moléculas y sistemas de escala nanométrica. Los rayos X resultan ideales para este propósito: su longitud de onda es del mismo orden de magnitud que el diámetro de los átomos, lo que permite «observar la sombra» que estos proyectan cuando son iluminados por rayos X. Además, las propiedades de la radiación pueden ajustarse para detectar átomos determinados (por ejemplo, solo los de hierro) y mostrar qué posición ocupan en un sólido o en una molécula de gran tamaño (como la hemoglobina).

Sin embargo, lo que la radiación de sincrotrón no puede hacer es rastrear el movimiento de los átomos en el interior de una molécula. Sus rayos X no revelan más que un contorno tenue y borroso, ya que los pulsos no resultan lo suficientemente breves o intensos. Por otro lado, una fuente de radiación de sincrotrón solo puede formar imágenes de moléculas si estas forman un cristal, donde los enlaces mantienen millones de ellas en perfecto orden, como soldados en formación.

Los láseres, por su parte, brillan con mucha mayor intensidad. Ello se debe a que producen luz coherente: su campo electromagnético no se agita como la superficie de un mar embravecido, sino que oscila con suavidad y regularidad. Ello permite concentrar una energía enorme en un punto diminuto, así como encenderlo y apagarlo en apenas un femtosegundo. Uno de nosotros (Bucksbaum) usa pulsos de láseres ópticos

Este dispara electrones a velocidades muy próximas a la de la luz, los cuales se hacen pasar después por un ondulador: un generador de campos magnéticos oscilantes que provoca que los electrones emitan rayos X. Dado que las partículas avanzan casi al mismo ritmo que la luz, el proceso se autoalimenta y genera un haz muy puro e intenso.



ultrarrápidos a modo de luz estroboscópica para estudiar el movimiento de los átomos y la manera en que se desarrollan las reacciones químicas.

Sin embargo, los láseres habituales funcionan con luz visible o con radiación cercana a esta parte del espectro; es decir, con longitudes de onda unas mil veces mayores que las que se necesitan para resolver un átomo individual. Al igual que un radar meteorológico puede detectar una tormenta pero no distinguir las gotas de lluvia, los láseres tradicionales pueden ver el movimiento de grupos de átomos pero no apreciar en detalle cada uno de ellos. Para proyectar una sombra nítida, la longitud de onda de la luz empleada debe ser al menos tan pequeña como el objeto que queremos observar. Por tanto, el estudio de los átomos requiere emplear láseres de rayos X. Pero construirlos no resulta nada fácil.

RAYOS DESTRUCTORES

Hubo un tiempo en el que construir un láser de rayos X sonaba a una idea de otro mundo. Los láseres ordinarios funcionan porque los átomos se comportan como baterías en miniatura: pueden absorber y liberar pequeñas cantidades de energía en forma de fotones, o partículas de luz. Por lo general, un átomo excitado emite fotones de manera espontánea. Pero, a principios del siglo xx, Albert Einstein postuló la existencia de cierto proceso que permitiría desencadenar esa liberación de cuantos de luz: la emisión estimulada.

Supongamos que un átomo absorbe cierta cantidad de energía. Si después se dirige contra él un fotón que posea esa misma cantidad de energía, el átomo podrá liberarse de la absorbida al principio emitiendo un fotón idéntico al incidente: una especie de clon. Ambas partículas de luz (la que golpeó al átomo y la que este emitió después) pueden desencadenar el mismo proceso en otro par de átomos. Ello derivará en una reacción en cadena que generará un ejército de fotones idénticos, cuyo número crecerá de forma exponencial. El resultado es un haz de luz láser.

Sin embargo, aun cuando se den las condiciones adecuadas, un átomo no siempre clonará el fotón incidente. La probabilidad de que eso ocurra es bastante pequeña. Además, existe una probabilidad mayor de que, antes de que tenga lugar el choque, el átomo se libere del exceso de energía de forma espontánea. Los láseres normales superan estas limitaciones bombeando energía para preparar los átomos y emplazando la muestra entre espejos, a fin de que la luz clonada se refleje una y otra vez. Ello facilita la captación de nuevas partículas de luz para el proceso de clonado. En un láser de helio-neón, como el que emplean los

STEPHAN KASSEMEYER/INSTITUTO MAX PLANCK DE INVESTIGACIÓN MÉDICA (*bacteriófago*)



DETECTORES EN EL INTERIOR de una cámara de vacío para obtener imágenes de células y proteínas.

lectores de códigos de barras de los supermercados, la luz se recicla unas 200 veces gracias a las reflexiones en los espejos.

En un láser de rayos X resulta muy difícil llevar a la práctica cada uno de los pasos descritos. Un fotón de rayos X puede ser unas mil veces más energético que uno de luz visible. Eso implica que los átomos deben absorber grandes cantidades de energía, la cual no retendrán durante un tiempo prolongado. Además, no es fácil fabricar espejos que reflejen rayos X. Aunque ninguno de estos impedimentos reviste un carácter fundamental, crear las condiciones adecuadas para la emisión de luz láser requiere aportar una energía enorme.

De hecho, el primer láser de rayos X obtuvo su energía a partir de un ensayo nuclear subterráneo. Fue construido en el marco de un proyecto secreto, de nombre clave Excalibur, llevado a cabo por el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, al este de San Francisco. La información es aún confidencial, aunque parte de ella se ha hecho pública. Aquel dispositivo formaba parte de la Iniciativa de Defensa Estratégica, más conocida como «Guerra de las Galaxias», propuesta por Ronald Reagan en los años ochenta para dotar a EE.UU. de un sistema que permitiese aniquilar satélites y misiles enemigos.

En aquella década también se construyó, en el mismo centro, la primera versión no nuclear y a escala de laboratorio de un láser de rayos X. En aquella ocasión la energía necesaria fue suministrada por potentes láseres ópticos diseñados para probar armas nucleares. No obstante, el dispositivo tampoco resultaba práctico para fines de investigación. La posibilidad de que algún día los láseres de rayos X pudiesen emplearse de manera regular en investigaciones científicas se antojaba remota.

EL RECICLAJE DEL SLAC

El avance que finalmente posibilitó el desarrollo de láseres de rayos X para uso civil provino de otra institución de la bahía de San Francisco, si bien se trató de un experimento que perseguía fines muy distintos. En los años sesenta, la Universidad Stanford construyó el mayor acelerador de electrones diseñado hasta entonces. Se alojaba en un edificio de tres kilómetros de longitud que, visto desde el cielo, parecía una aguja que apuntase desde las montañas al campus de la universidad. El Centro para el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) fue concebido para impulsar haces de electrones a velocidades muy próximas a la de la luz (con una diferencia de apenas un centímetro por segundo). Con el tiempo, los experimentos de física de partículas realizados en aquella instalación darían lugar a tres premios Nobel.

Como laboratorio de física de partículas, el acelerador del SLAC llegó al final de su vida útil hace unos años; hoy, los físicos llevan a cabo sus experimentos en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en las inmediaciones de Ginebra. Hace una década, Stanford y la Oficina Científica del Departamento de Energía de EE.UU. decidieron transformar una parte de la veterana instalación en un láser de rayos X. A tal fin, dotaron al acelerador del mismo equipo empleado en los sincrotrones modernos para producir rayos X: un ondulador.

Los onduladores constan de una batería de imanes que generan campos magnéticos alternos. Los electrones que se mueven a través de ellos serpentean y, en el proceso, emiten rayos X. En un sincrotrón —cuya geometría es circular—, una vez que los electrones abandonan el ondulador, sus trayectorias se doblan en forma de arco de circunferencia. De esa manera, las partículas se apartan del camino que siguen los rayos X, los cuales se canalizan hacia las estaciones experimentales. Los electrones se mantienen en movimiento alrededor del circuito y emiten ráfagas de rayos X cada vez que pasan a través del ondulador.

El acelerador del SLAC, en cambio, es rectilíneo y posee un ondulador de una longitud inusual (130 metros). En él, los electrones avanzan en la misma dirección que los fotones y casi a la misma velocidad. Como resultado, las partículas de luz golpean a los electrones una y otra vez y, al hacerlo, provocan que estos emitan más fotones idénticos. Gracias a ello se consigue un proceso de emisión estimulada.

Dado que electrones y fotones avanzan juntos, no se requieren espejos que hagan rebotar la luz. Todo lo que se necesita para generar la luz láser es un haz intenso de electrones rápidos y un espacio amplio en el que alojar un ondulador de gran tamaño. En el SLAC se cumplen ambos requisitos. Si se consigue un buen alineamiento, se generará un haz láser de rayos X de un brillo extraordinario. Al final del recorrido, un imán desvía los electrones y los fotones continúan hacia las estaciones experimentales. Semejante dispositivo recibe el nombre de láser de electrones libres.

La LCLS es una máquina formidable. Alcanza intensidades de hasta 10^{18} vatios por centímetro cuadrado, miles de millones de veces más que la que puede lograrse en un sincrotrón. Su luz es capaz de cortar el acero y su campo electromagnético oscilante alcanza magnitudes mil veces mayores que las de los campos que enlazan los átomos en una molécula.

EL CORAZÓN DE LA MATERIA

El centro recibe tantas propuestas de investigación que apenas puede aceptar una de cada cuatro. Los científicos de plantilla trabajan con nutridos equipos de visitantes (integrados por res-

ponsables científicos, ayudantes posdoctorales y estudiantes) en maratones de 12 horas por jornada durante cinco días. Cada microsegundo cuenta. Las posibilidades de investigación que brinda un láser de rayos X son inmensas. A modo de ejemplo, aquí nos centraremos en dos que revisten un interés particular para nosotros: el estudio del comportamiento de la materia bajo condiciones extremas y la toma ultrarrápida de imágenes de moléculas. Ambas líneas de trabajo se encuentran estrechamente unidas a procesos fundamentales de física atómica, molecular y óptica, nuestra área de investigación.

Cuando la LCLS crea átomos huecos en moléculas y sólidos, los electrones de las capas más externas se precipitan hacia el núcleo y sustituyen a los que han escapado de los orbitales interiores. Este fenómeno, llamado relajación de Auger, tarda unos pocos femtosegundos en completarse. Por tanto, si hacemos incidir un pulso de rayos X de un femtosegundo, los electrones exteriores no tendrán tiempo de ocupar los huecos internos. En tales condiciones los átomos huecos serán transparentes a cualquier otro fotón de rayos X. En el LCLS hemos detectado esa transparencia no solo en átomos, sino también en moléculas y otras muestras de mayor tamaño.

Varias consideraciones teóricas hacen pensar que, en el interior de los planetas gigantes, como Júpiter, se alcanzan temperaturas de unos 20.000 grados Kelvin, cuatro veces mayores que en la superficie del Sol. Se cree que los elementos principales que componen estos planetas, hidrógeno y helio, adoptan en el interior del astro inusuales fases sólidas, caracterizadas por densidades extremas y una estructura exótica. Sin embargo, los detalles no se conocen bien. Ni siquiera la resistencia mecánica del material (cuánto se encoge en respuesta a la presión) resulta fácil de entender a partir de principios básicos. Hasta ahora, la investigación en este campo se ha basado sobre todo en modelos teóricos, pero los experimentos con potencial para validarlos han sido muy escasos.

Algunos de los primeros ensayos realizados en la LCLS intentaron recrear esas condiciones tan hostiles. La colosal intensidad del láser permite calentar la materia a una velocidad vertiginosa, lo que produce efectos muy poco corrientes. Así, hemos observado por primera vez cómo múltiples fotones de rayos X inciden sobre moléculas formadas por un gran número de átomos y arrancan de ellas electrones fuertemente ligados a sus respectivos núcleos: un proceso llamado absorción multifotónica. La alta densidad de fotones puede también liberar varios electrones de un solo átomo, así como de moléculas y sólidos, y crear huecos como los descritos con anterioridad; un fenómeno que recibe el nombre de absorción secuencial. Además, los rayos X muy intensos rompen con suma rapidez todos los enlaces de las moléculas que se cree que se encuentran en el interior de los planetas gigantes, como agua, metano y amoniaco. Medir las propiedades de la materia en tales condiciones ha permitido determinar la ecuación de estado (la relación entre densidad, presión y temperatura) relevante para describir el interior de esos planetas, así como los impactos de meteoritos.

EXPLOSIONES DE PROTEÍNAS

La segunda línea de investigación que expondremos aquí se basa en emplear el láser a modo de cámara de rayos X de alta velocidad. Con ello se pretende obtener imágenes de moléculas y filmar procesos físicos, químicos y biológicos: una posibilidad que está ayudando a cubrir grandes lagunas de conocimiento.

Aún sabemos muy poco sobre la estructura de numerosas moléculas biológicas; sobre todo, proteínas de membrana y complejos macromoleculares. La técnica usual para estudiarlas, la cristalografía, implica aislar las moléculas de interés y fabricar con ellas un cristal lo suficientemente grande y perfecto para difractar a través de él radiación de sincrotrón. El patrón resultante permite determinar la estructura de la molécula. Sin embargo, el inconveniente reside en que los rayos X dañan de inmediato las moléculas que analizan. Para compensar dicho efecto, deben prepararse cristales de gran tamaño; no obstante, numerosas moléculas de interés, como las proteínas de membrana, no forman cristales con facilidad. Además, la técnica de estudio con luz de sincrotrón es lenta, lo que impide observar los fenómenos químicos transitorios que se desarrollan en pocos femtosegundos.

A primera vista, la LCLS parece un instrumento muy poco adecuado para ese fin. Dado que la radiación que genera es miles de millones de veces más intensa que la luz de sincrotrón, los materiales frágiles, como proteínas o estructuras no cristalinas, se convertirán enseguida en un plasma de partículas. Sin embargo, dado que se trata de pulsos extremadamente breves e intensos, resulta posible obtener una imagen de la molécula en menos tiempo de lo que esta tarda en estallar. Aunque el láser destruye la muestra, capta una imagen muy nítida de la molécula justo antes de que desaparezca. Este método, llamado «difracción antes de la destrucción», ya ha comenzado a rendir sus primeros frutos. La cristalografía de femtosegundos ha permitido registrar diagramas de difracción de nanocristales, proteínas y virus. Un trabajo reciente, por ejemplo, ha trazado la estructura de las proteínas implicadas en la enfermedad del sueño, una dolencia fatal causada por parásitos protozoarios.

Tras el LCLS, varios laboratorios de Europa y Asia están planeando o construyendo sus propios láseres de electrones libres. Esta nueva generación de instalaciones gozará de mayor estabilidad y permitirá controlar mejor el haz. Uno de los objetivos más importantes será lograr pulsos de rayos X aún más breves. Si se alcanzase una duración de 0,1 femtosegundos (100 attosegundos, o trillonésimas de segundo), sería posible observar no solo el movimiento de los átomos, sino el de los electrones de átomos y moléculas. Los futuros dispositivos tal vez incluso permitan controlar ese movimiento. El sueño de filmar cómo se rompen los enlaces químicos y se forman otros nuevos se encuentra por fin a nuestro alcance.

PARA SABER MÁS

Femtosecond electronic response of atoms to ultra-intense X-rays. L. Young et al. en *Nature*, vol. 466, págs. 56-61, julio de 2010.
Femtosecond X-ray protein nanocrystallography. Henry N. Chapman et al. en *Nature*, vol. 470, págs. 73-77, febrero de 2011.
Single mimivirus particles intercepted and imaged with an X-ray laser. M. Marvin Seibert et al. en *Nature*, vol. 470, págs. 78-81, febrero de 2011.
Double core-hole spectroscopy for chemical analysis with an intense X-ray femtosecond laser. N. Berrah et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 108, n.º 41, págs. 16.912-16.915, octubre de 2011.
Creation and diagnosis of a solid-density plasma with an X-ray free-electron laser. S. M. Vinko et al. en *Nature*, vol. 482, págs. 59-63, febrero de 2012.
Natively inhibited *Trypanosoma brucei* cathepsin B structure determined by using an X-ray laser. Lars Redecke et al. en *Science*, vol. 339, págs. 227-230, enero de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La generación de rayos X ultrabrillantes. Massimo Altarelli, Fred Schlachter y Jane Cross en *IyC*, febrero de 1999.
Láser de pulsos ultracortos. John-Mark Hopkins y Wilson Sibbett en *IyC*, noviembre de 2000.
Rayos X para escudriñar el nanocosmos. Gerhard Samulat en *IyC*, junio de 2012.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Crujir de dedos

El sonido que se produce al estirar una articulación obedece a un proceso no muy distinto del que tiene lugar cuando abrimos una lata de refresco

Todos lo hemos hecho alguna vez: tiramos de uno de nuestros dedos y oímos un crujido. ¿A qué se debe tan intrigante sonido? Varios estudios respaldados por radiografías confirman lo que algunos habían adelantado ya en los años setenta del pasado siglo: ese crujido obedece a la formación de burbujas en las articulaciones. Pero ¿por qué se forman esas burbujas?

Atendamos en primer lugar a la morfología de las articulaciones. Para facilitar el movimiento entre los huesos, el contacto entre dos de ellos se encuentra asegurado por varios intermediarios. Los extremos están protegidos por cartílago, un material sólido y elástico que resiste bien tanto la compresión como la tracción. Por otro lado, la lubricación entre ambos la proporciona una fina capa de líquido sinovial, una sustancia viscosa que reduce el rozamiento entre los cartílagos.

Cuando tiramos de los huesos, forzamos la distensión de la articulación. Ello provoca que la presión en el líquido sinovial decrezca de manera considerable, llegándose a alcanzar valores de hasta –2 atmósferas. Se produce entonces un proceso de cavitación; es decir, la aparición de burbujas de gas en el seno del líquido. Es la rápida expansión de esas burbujas, cuyo diámetro puede alcanzar 0,5 milímetros, la responsable del crujido.

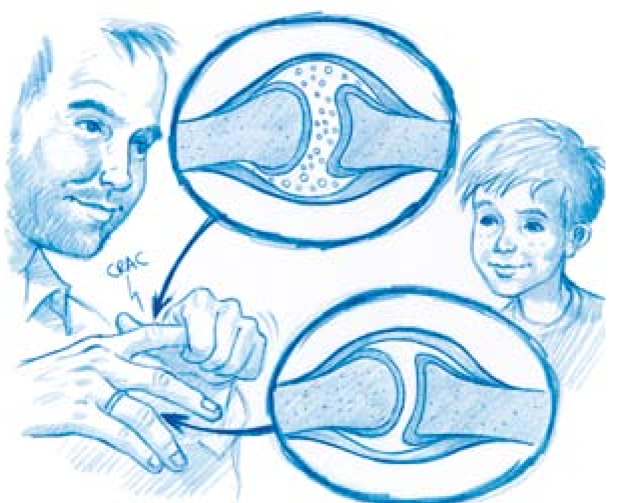
De la botella...

Para entender el origen de las burbujas pensemos primero en el ruido que se produce al abrir una botella de gaseosa. La presión en el interior del recipiente disminuye hasta igualar a la atmosférica; al mismo tiempo, aparecen burbujas en la bebida. Estas se encuentran formadas por el dióxido de carbono que previamente se ha disuelto en el refresco. Y, tal y como descubriera el físico William Henry en 1803, la cantidad de gas disuelto en un líquido resulta proporcional a la presión que el primero ejerce sobre el segundo.

La ley que acabamos de mencionar se comprende bien en términos microscópicos. La presión que ejerce un gas se debe a los numerosos choques de sus moléculas contra la superficie considerada. En el caso de un líquido, la mayoría de las moléculas rebotarán; sin embargo, una fracción de ellas acabará incorporándose a él. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas de gas disueltas en el líquido se aproximarán a la superficie y, como producto del azar que gobierna las colisiones, adquirirán la energía necesaria para escapar.



AL ABRIR UNA BOTELLA DE GASEOSA, la presión sobre el líquido disminuye y se forman burbujas de dióxido de carbono. Si luego volvemos a tapar el recipiente y le aplicamos presión con una bomba, impediremos que se formen más burbujas. Sin embargo, dado que la presión parcial del dióxido de carbono en el aire situado por encima del líquido será mucho menor que antes de haber abierto la botella, el gas continuará abandonando el líquido por difusión.



CUANDO ESTIRAMOS UN DEDO, el volumen de la articulación aumenta en un 20 por ciento. Ello reduce de manera considerable la presión del líquido sinovial, lo que conduce a la formación de burbujas de hasta 0,5 milímetros de diámetro. El crujido que oímos se debe a la rápida expansión de esas burbujas y a las vibraciones que estas producen.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

Por un lado, la fracción de las moléculas que escaparán resultará proporcional a la concentración del gas disuelto; por otro, la cantidad de ellas que se incorporen al líquido será proporcional a la densidad de moléculas en fase gaseosa y, por tanto, a la presión del gas. Así pues, el equilibrio se alcanzará cuando la concentración de gas disuelto compense la presión parcial del gas en el exterior del líquido (es decir, la parte de la presión total debida al gas que estemos considerando, ya que el aire consta de una mezcla de gases).

La ley que acabamos de describir da cuenta de lo que ocurre al abrir un recipiente de agua mineral con gas, una lata de refresco carbonatado o, más raramente —por desgracia—, una botella de champán. En la atmósfera, la presión del dióxido de carbono asciende a unas 360 microatmósferas. Todas las aguas que se encuentran en contacto con el aire contienen CO_2 disuelto; a 20 grados Celsius, su concentración asciende a unos 0,8 miligramos por litro.

En la mayoría de las sodas, sin embargo, la concentración puede llegar a entre 5 y 8 gramos por litro. Ello se debe a que tales bebidas se preparan bajo una presión equivalente a cuatro atmósferas de dióxido de carbono puro. Al abrir una botella, la bebida pierde poco a poco casi todo el gas. Una lata de 33 centilitros, por ejemplo, liberará en torno a un litro de dióxido de carbono.

¿Cómo evitar que la bebida pierda las burbujas? La única solución consiste en volver a tapar herméticamente la botella, a fin de que aumente la presión del dióxido de carbono situado sobre el fluido. En el pasado, algunos inventores creyeron haber encontrado algo mejor: un tapón hermético provisto de una pequeña bomba, la cual permitía presurizar rápidamente el interior de la botella. Por desgracia, lo que cuenta no es la presión total en el recipiente, sino solo la ejercida por el dióxido de carbono. Dado que el aporte de dióxido de carbono atmosférico es muy reducido, este apenas afecta a la cantidad de gas que abandonará la bebida. Así, aunque se retrasará la formación de burbujas, el resultado final será el mismo que el que se consigue con un tapón hermético ordinario.



REDUCIR LA PRESIÓN en el seno de un líquido para extraer de él los gases disueltos podría ayudar a respirar a los buceadores. Al hacer rotar el agua de un cilindro, la presión en las zonas próximas al eje disminuye, lo que induce la formación de burbujas. Para poder respirar a partir del oxígeno disuelto en el agua de mar, sin embargo, habría que tratar unos 300 litros de agua de mar por minuto.

... a las articulaciones

Ya podemos analizar lo que ocurre en nuestras articulaciones. El líquido sinovial contiene una parte considerable de gas disuelto, cuatro quintas partes del cual corresponden a dióxido de carbono. Al estirar el dedo y reducirse la presión, parte de ese gas retornará a la fase gaseosa. Para que eso ocurra, la presión debe ser muy baja; sin embargo, una vez creadas algunas burbujas, estas aumentarán de volumen con rapidez. Después, su expansión generará las vibraciones responsables del crujido.

En general, el gas liberado aumenta el volumen de la articulación en casi un 20 por ciento. Una vez formadas las burbujas y relajado el dedo, no es posible volver a producir de inmediato otro crujido, pues deberemos esperar a que el gas se disuelva de nuevo.

¿Se desaconseja hacer crujir los dedos? La energía liberada en el proceso es del orden de 0,1 milijulios por milímetro cúbico, unas diez veces menor de lo que se considera dañino para el cartílago. Parece, pues, que esta acción no debería ejercer consecuencias a largo plazo sobre las articulaciones. Aunque no existe un consenso al respecto, varios estudios médicos realizados sobre un gran número de sujetos no han observado vínculos entre el hábito de hacer crujir los dedos y la aparición de reumatismos.

Por último, la posibilidad de generar burbujas en un líquido mediante la reducción de la presión podría tener sus propias aplicaciones. El inventor israelí Alón Bodner concibió hace unos años un procedimiento para respirar bajo el agua aprovechando el oxígeno disuelto en el mar. A presión atmosférica, un litro de agua de mar contiene unos 8 miligramos de oxígeno. Dado que un nadador necesita del orden de dos litros de oxígeno por minuto (2,6 gramos), deberían tratarse unos 300 litros de agua de mar en ese período de tiempo. La idea de Bodner consiste en centrifugar el agua en un cilindro a fin de relajar la presión en la zona próxima al eje y liberar el gas. Un cilindro de unos diez centímetros de radio que gire a unas 1500 revoluciones por minuto basta para reducir la presión en una atmósfera. La técnica aún resulta insuficiente para aprovisionar a buzos autónomos, pero podría aprovecharse en instalaciones submarinas.

PARA SABER MÁS

The audible release associated with joint manipulation. R. Brodeur en *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, vol. 18, n.º 3, págs. 155-164, 1995.

Henry's law and noisy knuckles. D. R. Kimbrough en *Journal of Chemical Education*, vol. 76, n.º 11, pág. 1509, 1999.

por Bartolo Luque



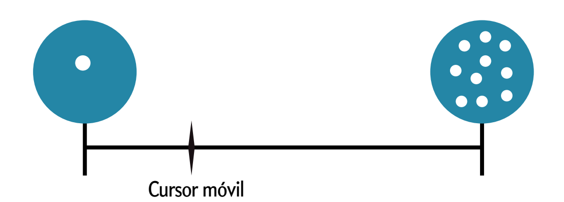
Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

El paraíso logarítmico perdido

Una pincelada de antropología matemática

Los mundurukus (*wuyjuyu*, en su propia lengua), un grupo indígena del Amazonas brasileño, forman una comunidad de unos 12.000 individuos que viven en pequeñas aldeas a lo largo del río Tapajós. La mayor parte de las tribus aborígenes de la Amazonía solo poseen palabras para denominar los números 1 y 2; por encima de esos valores, emplean términos cualitativos, como *muchos*. Los mundurukus disponen de un sistema algo más refinado, ya que tienen nombres para los cinco primeros naturales. Pero, como en realidad su interés por contar es casi nulo, la frecuencia y la precisión con la que usan dichas palabras decrece a medida que las cantidades se alejan del 1 o del 2. Así, en ocasiones utilizan la palabra asociada al número 5 (*pũg põgbi*, «una mano») para describir un conjunto de cuatro objetos o uno de seis.

Los mundurukus carecen, pues, de un verdadero sistema para contar y no poseen conceptos precisos para los números, sino solo aproximados. Esta virginidad numérica, esta ausencia de un sistema numérico verbal robusto, ha permitido a los antropólogos investigar la naturaleza de algunas de nuestras intuiciones numéricas más básicas. ¿Son universales o están moldeadas por la cultura?



1. REPRODUCCIÓN del esquema que se mostró a los mundurukus en la pantalla de un ordenador portátil. Los números 1 y 10 estaban representados por conjuntos de puntos. Al enseñarles una nueva cantidad, los participantes debían indicar el lugar del segmento con el que la asociaban.

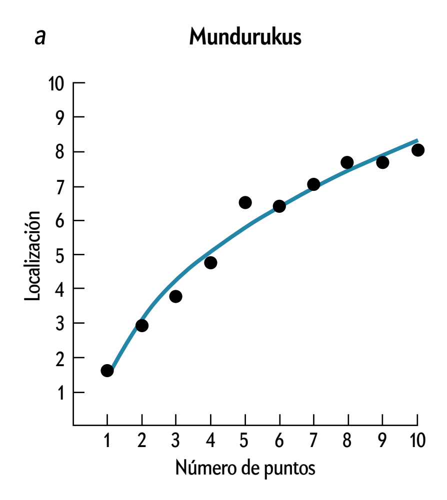
En 2008, el matemático y neurocientífico francés Stanislas Dehaene diseñó, junto con otros investigadores, una batería de tests encaminados a abordar tales cuestiones. Nos centraremos aquí en uno de ellos, concebido para determinar la manera en que los mundurukus tendían a colocar los números sobre una línea.

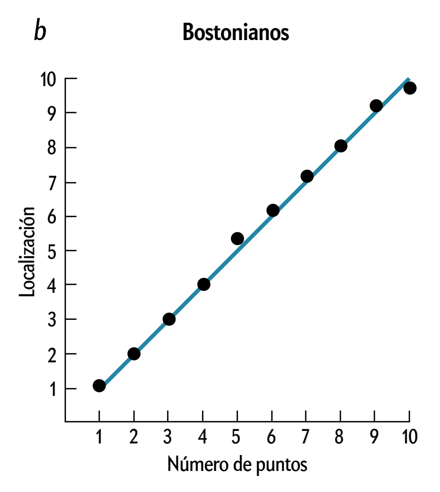
Para nosotros, resulta «natural» utilizar gráficas, reglas de medida o cintas métricas basadas en una escala lineal: aquellas en las que la distancia entre el 1 y el 3 coincide con la que, por ejemplo, separa el 8 y el 10. En nuestra civilización, esa manera de asociar números y puntos de un espacio unidimensional reviste una importancia clave a la hora de medir y hacer matemáticas. Pero ¿se trata de una invención cultural o de una intuición universal?

Uno de los autores del estudio, el lingüista Pierre Pica, tuvo el honor de realizar el test a los mundurukus en su propio territorio. En la pantalla de un ordenador portátil les mostró una línea horizontal de 25 centímetros. En ella, el número 1 se había localizado como referencia en el extremo izquierdo, y el 10, en el derecho. Dado que los mundurukus carecen de símbolos numéricos, los investigadores representaron dichas cantidades mediante sendos conjuntos de uno y diez puntos (*véase la figura 1*).

El test comenzaba describiendo el dibujo en los siguientes términos: «Aquí hay un camino que va de “uno” (*pũg ma*) a “muchos” (*xep xep põgbi*)». Después, mediante un conjunto de n puntos, se les mostraba un número n comprendido entre 1 y 10 y se les decía: «Por favor, coloque sobre el camino la cantidad n». El munduruku indicaba la localización que consideraba apropiada, el experimentador situaba el cursor en el punto señalado y, si el participante daba su aprobación, clicaba y guardaba el resultado. Los números presentados al participante se escogían siempre de manera aleatoria.

La figura 2*a* muestra los resultados promediados de 35 pruebas realizadas a 33 mundurukus. En el eje de abscisas aparecen los números que los participantes debían colocar sobre la recta; en el de or-





2. RESULTADOS promediados de los experimentos realizados con los mundurukus; el mejor ajuste de los datos es logarítmico (*a*). Resultados del mismo experimento efectuado con bostonianos; el mejor ajuste es lineal (*b*).

FUENTE: S. DEHAENE ET AL., *SCIENCE* 320, 2008 (*esquema y gráficas*)

denadas, las posiciones estimadas sobre el intervalo [1, 10]. Cada punto de la gráfica representa la respuesta promedio para el posicionamiento del número n.

Como puede observarse, los mundurukus colocaban las cantidades en orden, pero dejaban más espacio entre dos números pequeños que entre dos grandes. De hecho, el ajuste de los datos revela que, de manera intuitiva, los mundurukus asignaban las posiciones según una escala logarítmica: $f(n) = a\log(n) + b$.

Los investigadores compararon ese resultado con el obtenido al realizar el mismo test con adultos de Boston. Tal y como muestra la figura 2*b*, en aquel caso el promedio reveló una relación claramente lineal, $f(n) = n$, como cabría esperar de una población acostumbrada a emplear escalas lineales en su vida cotidiana.

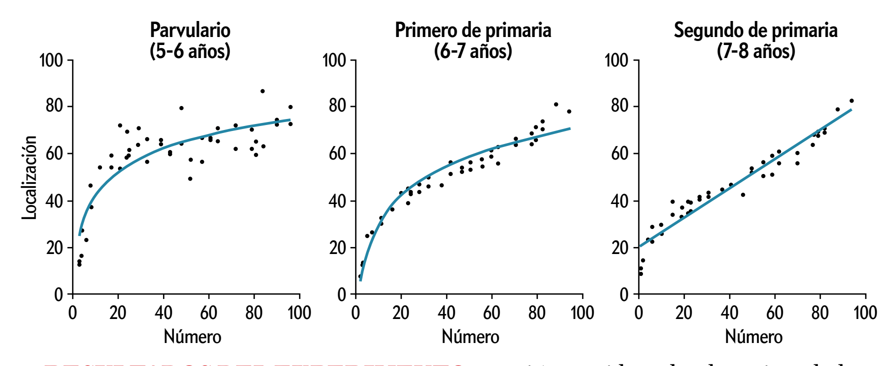
Así pues, mientras que un bostoniano sitúa el número $n + 1$ a una distancia 1 del número n, un munduruku lo coloca a una distancia igual a $(a\log(n + 1) + b) - (a\log(n) + b) = a\log((n + 1)/n)$. Dicho de otro modo: para los bostonianos la distancia entre dos números se relaciona con su diferencia, pero para los mundurukus lo hace con su cociente.

Los números en la infancia

Unos años antes, en 2004, los psicólogos Robert S. Siegler y Julie L. Booth habían llevado a cabo un experimento similar con tres grupos de niños occidentales: uno de parvulario, otro de primer curso de primaria y un último de segundo, con edades medias de 5,8, 6,9 y 7,8 años, respectivamente. En aquel caso, se les pidió que situaran sobre una línea los números comprendidos entre el 1 y el 100.

Como puede observarse en la figura 3, los niños de parvulario distribuían los números de forma logarítmica. Pero en primero de primaria esa tendencia comenzaba a declinar y, en segundo, los pequeños ya colocaban los números de manera lineal, o equiespaciada.

Así pues, parece que los niños occidentales con escasa educación matemática también emplean escalas logarítmicas a la hora de asociar números y posiciones espaciales. La correspondencia lineal solo se desarrolla entre los 5 y los 7 años, y se asienta definitivamente entre los 7 y los 8. Puesto que los mundurukus adultos mostraron la misma asociación logarítmica que los niños occidentales de preescolar, parece que son la educación y la experiencia cultural, más que un proceso universal de desarrollo, las responsables de la emergencia de la escala lineal.



3. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO con niños occidentales de varias edades y números comprendidos entre el 1 y el 100. Los ajustes correspondientes muestran la progresión desde una escala logarítmica hasta una lineal.

FUENTE: R. S. SIEGLER Y J. L. BOOTH, *CHILD DEVELOPMENT* 75, 2004

No deja de resultar curioso que la escala logarítmica sea la más intuitiva o natural, teniendo en cuenta los quebraderos de cabeza que todos hemos sufrido y sufrimos con ella. Qué profesor no experimenta dificultades al explicar a sus alumnos el *p*H, una medida de la acidez que corresponde al logaritmo de la concentración de iones hidrógeno cambiado de signo; o la intensidad sonora en decibelios, que equivale a 10 veces el logaritmo del cociente de la intensidad sonora dividida por una intensidad de referencia; o la famosa escala de Richter para la intensidad de los terremotos; o las magnitudes de brillo de las estrellas y los planetas, por poner solo unos cuantos ejemplos [*véase* «La deuda del Estado en decibelios», de Norbert Treitz en Investigación y Ciencia, diciembre de 2012].

Si todos sentimos cierta incomodidad y desorientación ante dichas escalas, ¿por qué las emplean los mundurukus y los niños? ¿Qué les hace pensar que los números mayores están más cerca unos de otros que los números más pequeños?

La explicación podría ser evolutiva. Varios experimentos han revelado que los animales comparan cantidades atendiendo a sus ratios, más que a su diferencia. Los investigadores creen que las proporciones resultan más importantes para sobrevivir que la habilidad para contar. Así pues, estimar rápidamente cantidades relativas y compararlas gozaría de mayores ventajas evolutivas que contar.

De hecho, la percepción logarítmica nos resulta natural en múltiples situaciones. La perspectiva, por ejemplo, nos hace percibir las distancias logarítmicamente: al contemplar un espacio abierto, el primer kilómetro nos parece más largo que el segundo. Algo similar sucede con nuestra impresión del paso del tiempo, que vuela cada vez más rápido a medida que envejecemos. Los psicólogos sospechan que todo ello obedece a una particularidad de nuestro sistema nervioso: la famosa ley de Weber-Fechner, que relaciona logarítmicamente la intensidad de un estímulo físico con la percepción que tenemos de él.

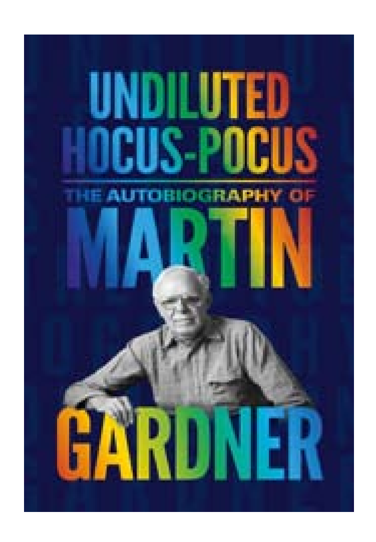
Pero hay algo que aún no hemos dicho. Cuando a los participantes de Boston se les presentaron conjuntos con muchos más puntos —y, por tanto, más difíciles de contar—, volvieron a surgir las escalas logarítmicas. Estas parecen continuar existiendo en los adultos por más que hayan pasado años contando, usando la aritmética y midiendo. De modo que, según Dehaene y su equipo, tendríamos acceso a dos clases de correspondencia numérico-espacial: la lineal, adquirida a través de la educación, y la logarítmica, producto de nuestra evolución como especie y a la que acudimos a falta de herramientas matemáticas precisas.

Así que no perdimos el paraíso logarítmico con nuestra infancia. Basta con que nos extraviemos en una jungla numérica poco familiar para que las escalas logarítmicas acudan de manera natural a orientarnos. Pruebe si no a colocar números entre $2^{43.112.609} - 1$ y $2^{57.885.161} - 1$, los dos últimos números de Mersenne conocidos hasta la fecha.

PARA SABER MÁS

Development of numerical estimation in young children. Robert S. Siegler y Julie L. Booth en *Child Development*, vol. 75, n.º 2, págs. 428-444, marzo de 2004.

Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in western and Amazonian indigene cultures. Stanislas Dehaene et al. en *Science*, vol. 320, n.º 5880, págs. 1217-1220, 30 de mayo de 2008.



UNDILUTED HOCUS-POCUS. THE AUTOBIOGRAPHY OF MARTIN GARDNER.
Princeton Univesity Press; Princeton, 2013.

Gardner

Figura eximia de la divulgación matemática

No podemos disociar a Gardner de la revista *Scientific American*, ni esta de Gardner. A ese maridaje lo llamó el episodio más feliz de su vida después de su boda con Charlotte Greenald. Cuando apareció *Investigación y Ciencia*, en octubre de 1976, la sección de matemática recreativa de la matriz estadounidense estaba en su apogeo. La versión española contó para su éxito con la traducción espléndida de Luis Bou.

Martin Gardner nació en Tulsa, estado de Oklahoma, el 21 de octubre de 1914 y falleció el 22 de mayo de 2010. Hijo de un geólogo especializado en sondeos petrolíferos, mostró un interés precoz por los rompecabezas y los juegos matemáticos. Siendo alumno de bachillerato, su padre le habilitó un pequeño laboratorio doméstico, donde había un microscopio, un mechero bunsen, matraces, tubos de ensayo, alambique y otros útiles elementales. El microscopio tenía los aumentos suficientes para observar amebas y paramecios sobrenadando en muestras de agua recogidas de estanques cercanos. Con un microtomo, practicó cortas de alas y de hojas de helecho. Construyó una fuente de Herón, un maravilloso invento del científico alejandrino. Y, por supuesto, guardaba colecciones de insectos, hojas, sellos, rompecabezas mecánicos y fósiles. Descubrió un ejemplar de trilobites.

Se matriculó en la Universidad de Chicago, donde se licenció en filosofía en 1936. Treinta años más tarde escribió con Rudolf Carnap *Philosophical foundations of physics* (1966), del que dice «cada idea es de Carnap, cada frase es mía». Tras graduarse se dedicó al periodismo, primero en el *Tulsa Tribune*, de donde pasó a la oficina de prensa de la Universidad de Chicago; también trabajó como asistente social de la administración en el llamado cinturón negro de Chicago.

Cuando los Estados Unidos entraron en guerra contra el Eje, se enroló en la Marina de guerra. Tras dos años en labores administrativas embarcó en el destructor *USS Pope*, el único buque que había capturado un submarino alemán y lo había llevado intacto a EE.UU. Hoy se conserva en el Museo de la Ciencia y de la Industria de Chicago. De la rendición alemana ofrece un recuerdo interesante. Componían la Marina jóvenes como ellos, felices de que terminara por fin la guerra, deseosos de entablar relaciones de amistad. Muy distintos eran los oficiales, sorprendidos de que algunos de los jefes norteamericanos fueran judíos y de que hubiera a bordo marinos negros. (Con todo, durante la guerra, los marinos negros dormían confinados en un rincón del buque y eran camareros de los oficiales.)

Cuando llegó la noticia al buque del lanzamiento de dos bombas atómicas en Japón, fue el único de la tripulación en percatarse de que la guerra había terminado y que el mundo había entrado en la era atómica. Conocía la existencia del proyecto Manhattan porque cuantos trabajaban como él en las relaciones de prensa de la Universidad de Chicago sabían que Enrico Fermi y sus colaboradores estaban trabajando en la fabricación de la bomba.

Tras la guerra volvió a la Universidad de Chicago. En 1950 publicó en *Antioch Review* el artículo «The hermit scientist», su primer trabajo de los muchos que dedicaría a develar la pseudociencia, uno de los campos en que destacó por su finura de análisis y lógica implacable. A comienzos de los cincuenta se trasladó a Nueva York y allí fue redactor y diseñador de la revista *Humpty Dumpty*. Durante ocho años escribió reportajes y relatos para la misma y para otras revistas infantiles, con incursiones en la papiroflexia. En 1960 apareció la edición original de *The annotated Alice*, su libro de mayor éxito dentro una centenar largo de obras muchas veces reeditadas en distintos idiomas.

Había publicado ya una serie de artículos sobre magia matemática en *Scripta Mathematica*, revista editada por Jekuthiel Ginsburg, de la Universidad Yeshiva, artículos que conformaron luego el libro *Mathematics, magic and mystery*, cuando Royal V. Heath le mostró un juguete que Gardner no había visto nunca. Era una estructura denominada hexahexaflexágono, que habían inventado y estudiado un grupo de doctorandos de la Universidad de Princeton. El primer *hexa* del vocablo remite al número de lados; el otro, al número de caras que pueden quedar expuestas. Tras haberle vendido un artículo a *Scientific American* sobre máquinas lógicas, pensó Gardner que a la revista le interesaría un artículo sobre flexágonos. Se publicó en diciembre de 1956, con tal éxito que todos los lectores de Nueva York se pusieron a construir flexágonos. (Son muchas todavía las sedes de Internet dedicadas a la teoría de flexágonos y variantes de sus formas originales.)

Ante semejante repercusión, Gerard Piel, consejero delegado de *Scientific American*, le invitó a iniciar una colaboración mensual, que llevaría por título «Mathematical games». La inició con un artículo sobre un tipo extraño de cuadrados mágicos. La colaboración se prolongó durante veinticinco años, de 1956 a 1981. Si miramos todos los artículos, compilados en quince libros, advertiremos que cada vez hay más complejidad matemática. Se explica porque el propio autor iba aprendiendo matemática, confiesa. Muchos académicos nunca imaginaron que Gardner no había cursado ningún año de matemática en la universidad. Ello no fue óbice para que se le considerara uno de ellos. A través de la sección entabló relación con matemáticos de primera fila, que aportaron nuevas ideas. «Mi ignorancia», cuenta Gardner, «me obligaba a escribir en términos que yo pudiera entender y eso me ayudaba a expresarme de forma que lo entendieran otros». (Declara en otro lugar que escribió el libro *Relativity simply explained* para comprobar si él mismo había entendido la tesis einsteiniana.)

Uno de los primeros matemáticos en contribuir fue Solomon Golomb, quien tiempo atrás redactara un ensayo sobre

poliominos. La primera incursión de la sección sobre doce pentominos conoció una difusión extraordinaria. Gardner volvió sobre el tema en varias ocasiones. Hoy se ha convertido en rama floreciente de la matemática recreativa. Los poliominos tienen parientes en dimensiones superiores. En el espacio tridimensional se llaman policubos, cubos unitarios por sus caras. El rompecabezas más famoso de policubos lo inventó Piet Hein; denominado Soma, consta de siete piezas no convexas que pueden formarse con tres o cuatro cubos unitarios. Igual que los artículos de la sección sobre poliominos, los dedicados a Soma y otros policubos abrieron un vasto campo de juegos matemáticos.

En la sección participó también Raymond Smullyan, destacado matemático y lógico eximio. Apareció asimismo en ella Roger Penrose y su teselación del plano. De especial resonancia en el ámbito matemático fue el artículo que daba a conocer el famoso autómata celular de John Conway. El juego de la vida, nombre que recibió, demostraba que, a partir de unas leyes simples emergían formas complejas que vivían, se movían y morían, igual que las formas iniciales de la vida. Conway había realizado nuevos descubrimientos sobre la teselación de Penrose; halló, por ejemplo, que las teselas podían teselar el espacio aperiódicamente. (Entre los entusiastas de su sección se le confesó Salvador Dalí.)

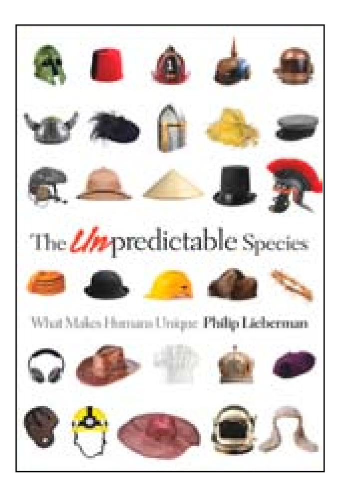
Gardner compartía muchas opiniones con Roger Penrose. Ambos eran platónicos, pues sostenían que los problemas y los objetos son descubiertos, no creados, dado que poseen una realidad independiente del conocimiento humano. Coincidieron en la idea de que ningún ordenador que podamos construir (con cables y semiconductores) alcanzará jamás la inteligencia creadora del hombre. Se numeraban entre los *mysterians*, gremio de quienes estaban convencidos de que la neurociencia ignoraba de qué modo el cerebro se percata de sus experiencias propias. En particular, sostenían que el problema duro de la consciencia, la existencia de los qualia, no puede resolverse por humanos. A quienes tal proponían, Owen Flanagan los denominó en *Science of the mind* (1991) *new mysterians* en referencia a un grupo musical famoso por entonces. Pertenecen a ese gremio Colin McGinn y Noam Chomsky. Este último distingue entre problemas que parecen solubles, al menos en principio, a través de métodos científicos, y misterios, que no parecen resolubles, ni siquiera en línea de principio. Señala que las capacidades cognitivas de los organismos están limitadas por su propia biología; un ratón no podrá nunca hablar como un humano y, de modo parecido, ciertos problemas transcenderán siempre nuestra comprensión.

De 1983 a 2002 Gardner firmó otra sección periódica en *Skeptical Inquirer* («Notes of a fringe-watcher»). La tenaz oposición de Gardner a la pseudociencia fue una constante de su vida. Su libro *Fads and fallacies in the name of science* (1952) es un clásico del movimiento escéptico. Sus dardos apuntan hacia el fletcherismo, quinesiología, dianética, ufología, percepción extrasensorial y psicoquinesia, entre otros. A ese libro le siguieron muchos otros: *Science: God, bad and bogus* (1981); *Order and surprise* (1983); *Gardner's whys & wherefores* (1989), etcétera. Gardner expuso sus ideas filosóficas en *Whys of a philosophical scrivener* (1983), que se ocupa de cuestiones básicas como «¿Por qué no soy un solipsista?», «¿Por qué no puedo tomar por dado el mundo real?».

Teísta confeso, sintió una absorbente fascinación por la religión. El tema ocupa parte extensa de esta autobiografía. Escribió sobre la coherencia lógica de la fe de Robert Maynard Hutchins, Mortimer Adler y William F. Buckley, Jr. entre otros. Su novela semiautobiográfica *The flight of Peter Fromm* dibuja un cristiano protestante pugnando con su fe, inspirado en los escritos de Miguel de Unamuno.

Con sus artículos y libros para matemáticos, ilusionistas, amantes de los rompecabezas y de las paradojas, Gardner ocupa un lugar preeminente en la ciencia del siglo xx. Por encima de cualquier otro, inspiró a toda una generación de jóvenes. Muchos deben a la lectura de sus «Juegos matemáticos» una vocación científica, como han reconocido en incontables casos. Persi Diaconis, entre los primeros. Nadie mejor que él para prologar la obra.

—Luis Alonso



THE UNPREDICTABLE SPECIES. WHAT MAKES HUMANS UNIQUE,

por Philip Lieberman. Princeton University Press; Princeton, 2013.

Homo impredictibilis

Ni todo está en los genes, ni el lenguaje es innato

Cuanto más se ahonda en un campo, más se relativiza su alcance. Frente al determinismo biológico hoy imperante, Lieberman se sitúa en una posición crítica y no ahorra explicaciones sobre las contradicciones internas que descubre en supuestas verdades apodícticas. Si algo caracteriza al hombre, resume, es su carácter impredecible. Y halla en el lenguaje su crisol de prueba. Nuestro cerebro, declara, evolucionó hacia una flexibilidad cognitiva que nos capacitó para la innovación y la imitación. Pone en cuestión el dogma central de la psicología evolutiva, según el cual nosotros estamos condicionados por unos patrones de comportamiento predecibles que quedaron fijados en los genes y rechaza la tesis chomskyana de que el lenguaje es innato.

Lieberman apoya su razonamiento con pruebas sacadas de la neurociencia, la genética y la antropología física. Muestra que los ganglios basales (estructuras profundas del cerebro de antiquísimo origen evolutivo) cobraron una importancia capital en la creatividad humana. La transferencia de información en esas estructuras, potenciada por mutaciones genéticas y evolución, creó circuitos neu-

rales que conjuntaron la actividad de diversas partes del cerebro. Unos circuitos que hicieron posible la invención humana, expresada en diferentes épocas y lugares en forma de útiles líticos, computadores digitales, nuevas formas artísticas y civilizaciones avanzadas.

El habla constituye una de las acciones más complejas de cuantas acometen los humanos, pero la mayoría aprende a realizarla sin el menor esfuerzo. La producción de un habla fluida requiere el movimiento, preciso y coordinado, de múltiples articuladores (labios, mandíbulas, lengua y laringe) en una escala temporal vertiginosa. La comunicación hablada depende de nuestra capacidad de producir sonidos muy dispares, que componen un lenguaje. Semejante diversidad sonora se explica por las configuraciones, muy flexibles, del tracto vocal. Cada articulador posee grados de libertad, que posibilitan el número amplio de movimientos del habla diferentes. Ignoramos en qué forma el hombre ejerce ese control exquisito. Un control cortical de la articulación que viene mediado, primariamente, por la mitad ventral del córtex sensorimotor lateral (córtex de Rolando).

En el curso de la evolución, estructuras y sistemas preexistentes se modifican para iniciar nuevos derroteros y acometer nuevas tareas. Nuestra capacidad de innovación, que distingue a la conducta humana de la de cualquier otra especie, obedece a esa lógica de diseño del coste mínimo. El registro arqueológico y las pruebas genéticas sugieren que el hombre dotado de nuestras mismas facultades cognitivas vivió ya hace 250.000 años. A diferencia de cualquier otra especie, nuestra acción y nuestro pensamiento resultan impredecibles. Una opinión antagónica es la defendida por lo que se ha dado en llamar psicología evolutiva, sostenida por Noam Chomsky, Richard Dawkins, Sam Harris, Marc Hauser y Steven Pinker. Proponen estos que nos gobiernan genes que se adquirieron en un pasado remoto, para no cambiar desde entonces. Pero nadie es religioso porque exista un gen que dirija sus creencias y pensamientos. La conducta moral no entraña portar un gen de la moral, ni el lenguaje se funda en un gen del lenguaje.

Para los defensores de la psicología evolutiva, el lenguaje, la capacidad matemática, la destreza musical o las cualidades sociales y múltiples aspectos más de nuestra vida se encuentran regulados por módulos «específicos de dominio». La especificidad de dominio lleva a afirmar que cada zona particular del cerebro ejerce una misión propia, independiente de otras estructuras neurales que, a su vez, cumplen sus propias funciones o procesos mentales. Steven Pinker sostiene que el lenguaje, en particular la sintaxis, deriva de los mecanismos cerebrales que son independientes de los implicados en otros aspectos de la cognición y, muy en particular, del control motor. Refinamientos ulteriores de la teoría modular dividen el lenguaje, un comportamiento complejo, en una serie de módulos independientes: un módulo de fonología que produce y percibe el habla, otro de sintaxis que ordena las palabras o interpreta su secuencia y un tercer módulo de semántica que toma en consideración el significado de cada palabra, permitiéndonos comprender el sentido de una oración. Los módulos pueden subdividirse en submódulos. La teoría de la modularidad se remonta a la frenología. Pretendía semejante pseudociencia explicar por qué había quienes se mostraban más diestros en matemática, eran piadosos, les cegaba la ambición o mostraban un comportamiento moral intachable. La respuesta se hallaba en las sedes del cerebro. Hoy se prefiere vincular estructuras neurales con genes.

Los mapas cerebrales propuestos por Korbinian Brodmann entre los años 1908 y 1912 se siguen empleando. En los estudios de neuroimagen, más refinados, se corre el peligro de que la misma denominación aluda a lugares distintos. La cartografía cerebral realizada por resonancia magnética funcional, que se vale del cromatismo para indicar niveles relativos de actividad en el cerebro, resulta de un complejo trabajo de procesamiento por ordenador. Las señales recogidas por resonancia magnética funcional son débiles y hay que monitorizar a un gran número de individuos que realizan la misma tarea para promediar luego las respuestas y desprenderse del ruido electrónico irrelevante. Pero promediar esas respuestas no es sencillo. El cerebro difiere de una persona a otra tanto como difiere su nariz, manos, pelo, brazos o piernas.

Los estudios con la técnica de neuroimagen conocida por tensor de difusión llevan ya identificados cientos de circuitos neurales en humanos. Intervienen en el control motor, la visión, la memoria y otros aspectos de la cognición. Importa, en particular, una clase de circuitos neuronales establecida entre el córtex y los ganglios basales subcorticales.

Los cambios genéticos introducidos hace entre 200.000 y 500.000 años aumentaron la eficiencia de los circuitos de los ganglios basales que confieren flexibilidad cognitiva, clave de la innovación y la creatividad. Esas mutaciones potenciaron también la capacidad de control motor, permitiéndonos el habla, facultad exclusiva del hombre que cumple una función central en el lenguaje, facilitando la transmisión de información de unos a otros. No necesitamos mirar a los demás para comunicarnos.

Nuestro cerebro no tiene la organización simple que los frenólogos de comienzos del xix propusieron, ni la estructura modular que defendían los psicólogos. Antes bien, la arquitectura funcional del cerebro humano refleja la lógica oportunista de la evolución. La frenología resurgió, en el ecuador del siglo. En 1861 Paul Broca publicó uno de los primeros estudios de un «experimento en la naturaleza» neural, el relativo al paciente Tan. De nombre real Leborgne, tenía 51 años cuando sufrió una serie de alteraciones neurológicas que le permitían controlar la entonación del habla, pero le impedían pronunciar palabra, salvo la sílaba «tan». Defendía la frenología que la parte del cerebro que controlaba el lenguaje se situaba entre los ojos. Broca no cuestionó la premisa de la frenología (una parte específica del cerebro era sede del lenguaje), aunque pensó que la sede en cuestión se hallaba en otro sitio.

El paciente murió al poco de que lo atendiera Broca. La autopsia reveló una lesión en la superficie del lóbulo frontal izquierdo. Broca limitó a ello sus observaciones, sin seccionar y determinar de una forma sistemática la naturaleza y extensión del daño. Meses más tarde, Broca examinaba un segundo paciente que podía pronunciar solo cinco palabras, tras haber sufrido un accidente cerebrovascular. La autopsia sacó a la luz una lesión aproximadamente en la misma zona superficial. Siguiendo las pautas de la frenología, Broca situó allí la sede del lenguaje, lugar denominado en su nombre «área de Broca».

El examen anatomopatológico de los dos pacientes no avala la teoría frenológica de Broca. Los cerebros se habían conservado en alcohol. Pasados 140 años, se les practicó una resonancia magnética, que puso de manifiesto una lesión masiva que afectaba a los circuitos neurales que vinculaban el córtex con los ganglios basales. La resonancia mostró, además,

que la zona que solemos denominar área de Broca (giro inferior izquierdo, áreas 44 y 45 de Brodmann) no correspondía al área cortical que estaba dañada en los dos primeros pacientes de Broca.

En 1874, Karl Wernicke estudió un paciente que había sufrido un accidente cerebrovascular, con dificultades para comprender el habla y con daño en la región temporal posterior de la corteza. En el espíritu de la frenología, Wernicke decidió que esa área era el órgano cerebral de comprensión del habla. Puesto que el lenguaje hablado comprende y produce el habla, Lichtheim propuso en 1885 una vía cortical que unía el área de Broca y la de Wernicke. De ese modo, las áreas corticales de Broca y de Wernicke se convirtieron en bases neurales del lenguaje humano, supuestamente asociadas al lenguaje y solo al lenguaje.

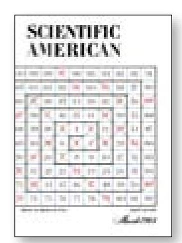
La teoría de Broca-Wernicke resultó ser falsa. Los síndromes, las pautas de posibles déficits, son reales, pero no derivan de la lesión cerebral localizada en dichas áreas corticales. Las tomografías demuestran que los pacientes se recuperaban o sufrían solo pequeños problemas cuando las áreas de Broca y Wernicke quedaban completamente destruidas, siempre y cuando los circuitos permanecieran incólumes. Las tomografías evidenciaron que los déficits de lenguaje del síndrome de Broca no implicaban necesariamente que se hallara lesionada el área de Broca. La lesión de estructuras subcorticales que supuestamente nada tienen que ver con el lenguaje, dejando intactas las áreas corticales de Broca y Wernicke, causaba los signos y los síntomas clásicos de afasia: déficits en la producción del habla y dificultades en la comprensión del significado de las frases.

La afasia, pérdida irreversible del lenguaje, se produce con la interrupción de los circuitos neurales que unen áreas corticales, ganglios basales, tálamo y otras estructuras subcorticales. La tesis aceptada ahora es la expuesta por Stuss y Benson en *The frontal lobes* (1986): la afasia no se da nunca en ausencia de daño subcortical. A la pregunta de si las áreas corticales de Broca y de Wernicke constituyen nuestro órgano cerebral del lenguaje debe responderse rotundamente que no. Antes bien, los circuitos neurales que conjugan la actividad de muchas áreas del cerebro controlan la producción del habla, entienden o componen una frase dotada de significado y realizan todos los demás actos y pensamientos que, en su conjunto, constituyen nuestra facultad del lenguaje.

En sí mismos, los ganglios basalesno encierran la clave del lenguaje humano. Deben trabajar en concierto con partes del córtex que se hallan implicadas en el control motor, la cognición y la regulación emocional. Las operaciones locales de los ganglios basales se pusieron de manifiesto a través del estudio y tratamiento de la enfermedad de Parkinson. La causa inmediata de esta patología degenerativa reside en la degradación de la *substantia nigra*, una estructura subcortical que, además de formar parte de la circuitería de los ganglios basales, produce dopamina, neurotransmisor implicado en el funcionamiento de aquellos. La red neural que integra los ganglios basales comprende dos subsistemas integrados: uno rápido, que abarca los neurotransmisores glutamato y GABA, conecta el córtex con los ganglios basales; y otro, que emerge del mesencéfalo, se vale de los neurotransmisores dopamina y acetilcolina en interneuronas que conectan neuronas del interior de los ganglios basales.

—Luis Alonso

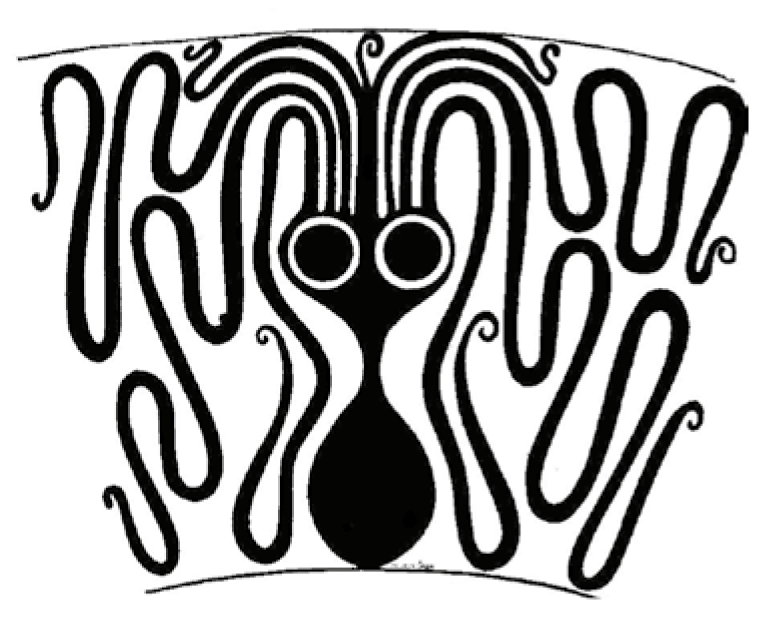
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Marzo 1964

Biología de la visión

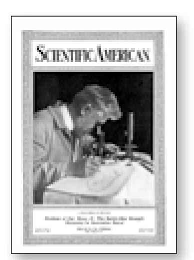
«Los estudiosos del aparato visual llegaron a suponer que la retina era como una película fotográfica; según esta idea, la función conjunta del ojo y el nervio óptico consistiría en formar un mosaico del mundo visual que luego se transmitiría al cerebro, donde tendría lugar la base de la percepción visual. Las investigaciones anatómicas han demostrado, empero, que hay más células receptoras en la retina que fibras en el nervio óptico. Es, por tanto, imposible que cada célula envíe un mensaje independiente al cerebro, y ha tenido que abandonarse la idea de que la red de células receptoras pudiera equipararse al granulado de una emulsión fotográfica.»



LA NATURALEZA EN EL ARTE: En 1911 el artista Jean Alexis Morin copió algunas pinturas de la cerámica antigua del Louvre. En un artículo de 1914, *Scientific American* reproducía los «horrendos tentáculos» de una sepia representada en una vasija para beber anterior al año 1000 a.C.

Un vidrio con misterio

«S. Donald Stookey y William H. Armisted, de la Vidriería Corning, han inventado un vidrio fotocrómico reversible. Mediante un ciclo de frío y calor se hace que una sal halógena de plata precipite en cristales dentro de un vidrio de silicato. Estas partículas son mucho más pequeñas que las de una emulsión fotográfica; de ellas hay unos ocho mil billones por centímetro cúbico de vidrio. Expuestos a la luz, los cristales se transforman en plata metálica en cuestión de segundos y se oscurecen, igual que le sucede al vidrio. Cuando la iluminación se atenúa o se suprime, se reconstituye la sal halógena de plata y el vidrio se aclara en pocos minutos u horas.»



Marzo 1914

Pulga a la vista

«Para preparar sus modelos, el Museo Americano de Historia Natural tiene la suerte de haber hallado en la persona del señor Ignaz Matausch a uno de los muy escasos y extraordinarios artistas científicos. Su última creación es una pulga en cera cuyo volumen se ha ampliado 1.728.000 veces respecto al del insecto. Aunque el modelo suscita la admiración por el habilidoso modo en que fue preparado, nada revela acerca de los meticulosos estudios preliminares que fueron necesarios. Por raro que parezca, hasta ahora no se había confeccionado imagen alguna del insecto en estado vivo. En los libros de texto este se representa muerto. Para los legos puede parecer algo trivial que el modelo ampliado en cera corresponda a una pulga viva o muerta. Pero los entomólogos están mejor informados.»

Sobre el arte antiguo

«Monsieur Morin-Jean (pseudónimo de Jean Alexis Morin), autor de *Le dessin des animaux en Grèce* ("El dibujo de los animales en Grecia"), maneja con igual facilidad el lápiz y la pluma. Los trescientos dibujos de este crítico francés, uno de los cuales se muestra en nuestra ilustración, presentan a sus lectores imágenes seleccionadas de jarrones griegos, italiotas y etruscos pintados, grabados y moldeados desde el año 800 a.C. hasta el declive del arte en la Italia meridional, hacia el año 300 a.C.»

Pensamientos de guerra

«Supongamos que dentro de dos años Gran Bretaña, agobiada por nuestro abuso de confianza (en caso de no rectificación) sobre la cuestión de los peajes del canal, acuerda mantener una postura de neutralidad, mientras que Alemania, gracias a la adquisición de una base en las Indias Occidentales, desafía a la doctrina Monroe con relación a la seguridad del canal de Panamá. Supongamos que, aliviada de sus ansiedades en casa, Alemania despacha al Caribe la totalidad de sus veintiséis acorazados de primera línea. ¿De qué lado nos ponemos? A sus veintiséis acorazados podríamos oponer doce.»

Estas cifras adquirirían una importancia vital al estallar la I Guerra Mundial cuatro meses después.

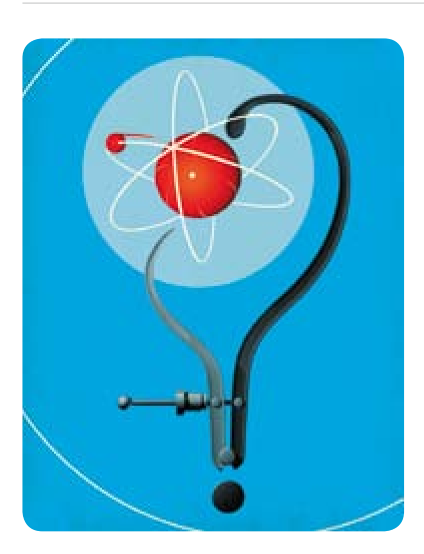


Marzo 1864

Lavaplatos patentado

«Hace tiempo aseveramos que las invenciones tienden a aminorar el trabajo del hombre y predecíamos que, dentro de poco, los inventores invadirían los recintos de las cocinas. La acción ya ha comenzado; publicamos aquí lo que podría llamarse "una máquina para la familia", pues está ideada para lavar platos, limpiar tubos de quinqué y fregar y afilar cuchillos, aunque no todo a la vez, sino mediante varias operaciones. Esta máquina atraerá a nuestras lectoras, quienes, nos complace saberlo, son entusiastas de la causa de la ciencia y acogen con agrado los últimos avances (actualmente hay pendientes varias patentes de solicitantes femeninas).»

SCIENTIFIC AMERICAN SUPLEMENT, VOL. LXXVII, N.º 1992, 7 DE MARZO DE 1914



FÍSICA

El problema del radio del protón

Jan C. Bernauer y Randolf Pohl

Dos experimentos han inferido valores muy distintos para el radio del protón. ¿Qué es lo que pasa?

ROBÓTICA

Cómo construir un robot con forma de pulpo

Katherine Harmon

Inteligente, fuerte y flexible, el pulpo ofrece un modelo atractivo para una clase totalmente nueva de robot con muchos brazos y múltiples habilidades.

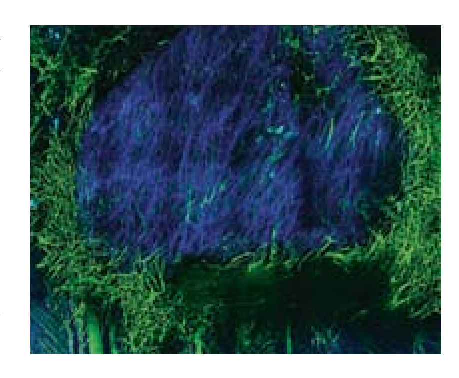


MEDICINA

Una forma indirecta de domar el cáncer

Rakesh K. Jain

Al oprimir los vasos sanguíneos, los tumores impiden que los agentes antitumorales lleguen a las células neoplásicas. La abertura de estos conductos permitiría restaurar el poder de los fármacos.



HISTORIA

La investigación soviética durante la Guerra Fría

Alexei B. Kojevnikov

Durante la Segunda Guerra Mundial, los científicos soviéticos subordinaron su trabajo a las necesidades militares. Acabado el conflicto, las autoridades empezaron lentamente a impulsar proyectos civiles en una transición que tuvo su momento álgido con el lanzamiento del satélite *Sputnik*.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Anna Llordés: *Ventanas inteligentes que modulan la luz solar*; Joandomènec Ros: *Nuevo mecanismo de creación de especies*; Sara Arganda: *Simulación de una célula viva*; Juan Manuel González Mañas: *Crear vida de la nada*; Luis Bou: *La mente inconsciente*; Luis Cardona: *Infecciones que invaden el mar*; Julio Samsó: *El nacimiento de la escritura en Egipto*; J. Vilardell: *El lento ascenso de las renovables*, *Curiosidades de la física* y *Hace...*; Mercè Piqueras: *Wurtz y la hipótesis atómica*; Fabio Teixidó: *Muros de agua*; Juan P. Adrados: *El generador de rayos X definitivo*; Juan P. Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España